

Diseño de una embarcación de 17,5 m de eslora

Trabajo Final de Grado



Facultad de Náutica de Barcelona
Universidad Politécnica de Catalunya

Treabajo realizado por:

Àlex Carreras Ruiz

Dirigido por:

Dra. Inmaculada Ortigosa Barragán

Grado en Ingeniería en Sistemas i Tecnología Naval

Barcelona, 10 de Julio de 2019

Departamento de Ciencia e ingeniería Náutica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona

Agradecimientos

A la directora del proyecto Inma Ortigosa por su paciencia y soporte,
a mi familia que me ha ayudado en todo el proceso,
y a mi pareja que me ha ayudado en todo para poder acabar este trabajo.

Resumen

En este documento se realiza el proyecto y el diseño preliminar de una embarcación de recreo planeadora de 17,5 metros de eslora. El estudio se realiza mediante la metodología de la espiral de diseño, que se usa habitualmente en la proyección de embarcaciones y artefactos navales. En este proyecto se realiza la primera vuelta de la espiral de diseño, de forma que el resultado obtenido verifique la viabilidad del proyecto y sienta las bases para un estudio detallado.

A partir de un estudio de mercado de embarcaciones a motor se determinan las dimensiones iniciales, punto de partida para el diseño del casco. Posteriormente se analiza la resistencia al avance del casco diseñado y se estima la potencia requerida para alcanzar la velocidad de diseño. A continuación, se define la disposición general, se realiza el escantillonado en materiales compuestos y se calculan los pesos de la embarcación y la posición centro de gravedad. Por último, se realizan los estudios de estabilidad, que verifican que la embarcación proyectada cumple con los requisitos de la categoría de diseño A.

En las conclusiones se analizan los resultados de mayor importancia en cada una de las etapas estudiadas. Además, se sugieren aspectos a corregir o a mejorar en futuras iteraciones del proyecto.

Abstract

In this document, the project and the preliminary design of a 17,5 meters planning craft is carried out. The study is done through the spiral design method, which is widely used in the projection of ships and naval artifacts. The first round of the spiral it's done in this project in order to check the viability of the project and set the baselines for a detailed study.

Beginning with a market study, the initial dimensions of the design are found. With those dimensions in mind the hull shapes will be designed. Later on, the water resistance of the hull is analysed and also the estimated power required to reach the speed. Next, the general arrangement is defined, the laminate of the composite materials is made and the weights of the boat and the position of the center of gravity are calculated. Finally, stability studies are made verifying that the projected vessel complies with the design category A.

In the conclusions of the project, the most important results are analysed in each of the stages studied. In addition, we will see what are the issues that must be corrected or improved in the future.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
TABLA DE CONTENIDO	IX
LISTADO DE FIGURAS	XIII
LISTADO DE TABLAS	XV
LISTADO DE GRÁFICOS	XVI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 OBJETIVO Y MOTIVACIÓN	1
1.2 MÉTODO DE ESTUDIO.	1
1.3 CONSIDERACIONES INICIALES	3
CAPÍTULO 2. DISEÑO PRELIMINAR	4
2.1 NOMENCLATURA Y DEFINICIONES BÁSICAS	4
2.1.1 MEDICIONES LONGITUDINALES	4
2.1.2 MEDICIONES TRANSVERSALES	5
2.1.3 MEDICIONES VERTICALES	5
2.1.4 OTROS DATOS	5
2.2 ESTUDIO DE MERCADO	6
2.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO	7
2.3.1 ESLORA TOTAL – ESLORA CON PLATAFORMA	8
2.3.2 ESLORA CON PLATAFORMA – ESLORA SIN PLATAFORMA	9
2.3.3 ESLORA SIN PLATAFORMA – ESLORA EN FLOTACIÓN	9
2.3.4 ESLORA CON PLATAFORMA – MANGA MÁXIMA	10
2.3.5 ESLORA SIN PLATAFORMA – CALADO	11
2.3.6 ESLORA EN FLOTACIÓN – PUNTAL	12
2.3.7 ESLORA CASCO – DESPLAZAMIENTO	12
2.3.8 MANGA – VELOCIDAD	13
2.3.9 ESLORA CASCO – POTENCIA	13
2.3.10 ESLORA CASCO – TANQUE DE COMBUSTIBLE	14
2.3.11 ESLORA CASCO – TANQUE DE AGUA	15
2.4 DIMENSIONES PRELIMINARES	15

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE FORMAS **17**

3.1 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA EMBARCACIÓN	17
3.1.1 SEMIÁNGULO DE ENTRADA EN LA LÍNEA DE FLOTACIÓN	17
3.1.2 ÁNGULO DE LA RODA CON EL PLANO DE FLOTACIÓN	18
3.1.3 FORMAS SECCIONALES	18
3.1.4 CURVAS DE ÁREAS SECCIONALES	19
3.1.5 FONDO DE LA EMBARCACIÓN	20
3.1.6 ÁNGULO DE ASTILLA MUERTA	22
3.1.7 RADENES	23
3.1.8 FLAPS	23
3.2 OBTENCIÓN DE FORMAS	24
3.2.1 DERIVACIÓN DE FORMAS	24
3.2.2 GENERACIÓN DE FORMAS	24
3.2.3 SERIES SISTEMÁTICAS DE FORMAS	24
3.3 DISEÑO DEL CASCO	25
3.3.1 MODELIZACIÓN DEL CASCO	25
3.4 OPTIMIZACIÓN DE FORMAS	30
3.4.1 RELACIÓN DESPLAZAMIENTO (Δ)– ESLORA DE FLOTACIÓN (LWL)	30
3.4.2 COEFICIENTE PRISMÁTICO (CP)	30
3.4.3 COEFICIENTE DE BLOQUE (CB)	30
3.4.4 COEFICIENTE DE LA MAESTRA (CM)	30
3.4.5 RELACIÓN ENTRE EL ÁREA SUMERGIDA DEL ESPEJO (AT) Y EL ÁREA DE LA CUADERNA MAESTRA (AX)	31
3.4.6 CENTRO LONGITUDINAL DE LA CARENA (LCB)	31
3.5 CARENA EN MAXSURF	31
3.5.1 IMPORTAR CARENA EN MAXSURF	31
3.5.2 CÁLCULOS HIDROSTÁTICOS I TRANSFORMACIÓN PARAMÉTRICA	32
3.5.2 CURVAS Y FORMAS	34
3.6 DIMENSIONES FINALES	35

CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN DEL SISTEMA PROPULSIVO **36**

4.1 RESISTENCIA AL AVANCE	36
4.1.1 DESCOMPOSICIÓN DE LA RESISTENCIA AL AVANCE	36
4.1.2 RESISTENCIA VISCOSA (RV)	37
4.1.3 RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS (RW)	37
4.1.4 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL	38
4.2 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA Y LA POTENCIA REQUERIDA	38
4.2.1 MÉTODO SAVITSKY	38
4.2.2 ESTIMACIÓN POTENCIA REQUERIDA EN MAXSURF RESISTANCE	40
4.2.3 ESTIMACIÓN POTENCIA REQUERIDA EN EXCEL	42
4.2.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	43

4.3 ELECCIÓN DEL SISTEMA PROPULSIVO	44
4.3.1 POTENCIA I RENDIMIENTO Y EFICIENCIA	44
4.3.2 SISTEMA DE PROPULSIÓN	45
4.3.3 HÉLICE Y HUELGOS	46
4.3.4 UNIDAD SELECCIONADA	46
CAPÍTULO 5. DISPOSICIÓN GENERAL	48
<hr/>	
5.1 DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES	48
5.1.1 POSICIÓN DE LA COLA Y EL MOTOR	48
5.1.2 DISPOSICIÓN DE LOS MAMPAROS TRANSVERSALES	49
5.1.3 DISPOSICIÓN REFUERZOS LONGITUDINALES	50
5.2 DISTRIBUCIÓN DE ESPACIOS	51
5.2.1 CÁMARA DE MÁQUINAS	52
5.2.2 PIQUE DE PROA	53
5.2.3 DISPOSICIÓN DE CUBIERTAS PLATAFORMA Y TECHO	53
5.3 ACOMODACIÓN	54
5.3.1 CUBIERTA INFERIOR	54
5.3.2 CUBIERTA SUPERIOR	55
CAPÍTULO 6. DISEÑO ESTRUCTURAL	57
<hr/>	
6.1 MATERIAL	57
6.2 NORMA	57
6.3 PROCEDIMIENTO	58
6.3.1 PREPARACIÓN DEL MODELO	58
6.3.2 INTRODUCCIÓN DE DATOS DE MATERIAL	60
6.3.3 INTRODUCCIÓN DE DATOS DE PANEL	60
6.3.4 CALCULO DE PRESIONES	62
6.4 LAMINADO FINAL	63
6.4.1 MATERIALES LAMINADO CASCO	64
6.4.2 SECUENCIA DEL LAMINADO CASCO	65
6.4.3 LAMINADO DE REFUERZOS	68
6.5 PESO CASCO	70
CAPÍTULO 7. CALCULO DE PESOS	72
<hr/>	
7.1 PESO EN ROSCA (LWT)	72
7.1.1 PESO EN ROSCA ESTRUCTURA	72
7.1.2 PESO EN ROSCA MAQUINARIA Y MOBILIARIO	73
7.1.3 PESO EN ROSCA TOTAL	74
7.1.4 MODIFICACIONES	74

7.2 PESO MUERTO (DWT)	76
7.3 DESPLAZAMIENTO	76
CAPÍTULO 8. ESTABILIDAD Y NAVEGABILIDAD	77
<hr/>	
8.1 CONDICIONES HIDROSTÁTICAS	77
8.1.1 MÁXIMA CARGA	77
8.1.2 CONDICIÓN DE CARGA DE SALIDA DE PUERTO	78
8.1.3 CONDICIÓN DE CARGA DE REGRESO A PUERTO	80
8.2 ENSAYOS DE ESTABILIDAD ISO 12217	81
8.2.1 ALTURAS DE INUNDABLES	81
8.2.2 ENSAYO DE COMPENSACIÓN DE CARGAS	82
8.2.3 ENSAYO DE RESISTENCIA A LAS OLAS Y VIENTO	84
8.3 EVALUACIÓN DE LOS ENSAYOS	86
CONCLUSIÓN	88
<hr/>	
REFERENCIAS	90
<hr/>	
BIBLIOGRAFIA	90
WEBGRAFIA	90
OTROS RECURSOS	91

Listado de Figuras

FIGURA 1. ESPIRAL DE DISEÑO – HTTP://ARQUITECTURABUQUE.BLOGSPOT.COM/2011/07/INTRODUCCION-LA-CONSTRUCCION-DEL-BUQUE.HTML	2
FIGURA 2. L_{MAX} Y L_H PARA MONOCASCO (FUENTE NORMA EN ISO 8666 PÁGINA 12).....	4
FIGURA 3. DETERMINACIÓN DE LA ASTILLA MUERTA (FUENTE NORMA EN ISO 8666 PÁGINA 18).....	6
FIGURA 4. SEMIÁNGULO DE ENTRADA EN LA LÍNEA DE FLOTACIÓN – FUENTE: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE FORMAS.....	18
FIGURA 5. ÁNGULO DE LA RODA CON EL PLANO DE FLOTACIÓN – FUENTE: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE FORMAS.....	18
FIGURA 6. FORMAS SECCIONALES DE PROA EN V Y U – FUENTE: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE FORMAS.....	19
FIGURA 7. CURVA DE ÁREAS SECCIONALES TÍPICA – FUENTE: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE FORMAS.....	19
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES TIPO EN FONDO PLANO – FUENTE: HIDRODINÁMICA.....	20
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES TIPO EN FONDO CÓNCAVO – FUENTE: HIDRODINÁMICA.....	20
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES TIPO EN FONDO CONVEXO – FUENTE: HIDRODINÁMICA.....	21
FIGURA 11. FORMAS V RECTAS – FUENTE: HIDRODINÁMICA.....	21
FIGURA 12. FORMAS V CON LIGERA CONCAVIDAD – FUENTE: HIDRODINÁMICA.....	22
FIGURA 13. FORMAS EN V CON LIGERA CONVEXIDAD – FUENTE: HIDRODINÁMICA.....	22
FIGURA 14. ÁNGULO DE ASTILLA MUERTA – FUENTE: DISEÑO ARQUITECTÓNICO DE BUQUES A MOTOR.....	22
FIGURA 15. SUSTENTACIÓN DE <i>SPRAY RAILS</i> – FUENTE: HTTPS://WWW.TOTALSIMULATION.CO.UK/SPRAY-RAILS/	23
FIGURA 16. <i>FLAPS</i> – FUENTE: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE FORMAS.....	23
FIGURA 17. SERIES 62 PARENT – FUENTE: ANTEPROYECTO.....	25
FIGURA 18. DIMENSIONES PERFIL – FUENTE: QUICK START GUIDE ORCA 3D.....	26
FIGURA 19. FORMAS DE FONDO – FUENTE: QUICK START GUIDE ORCA 3D.....	27
FIGURA 20. FORMAS LLENAS O FINAS EN PROA – FUENTE: QUICK START GUIDE ORCA 3D.....	27
FIGURA 21. ÁNGULOS PERFIL – FUENTE: QUICK START GUIDE ORCA 3D.....	28
FIGURA 22. PARAMETROS ASTILLA MUERTA – FUENTE: QUICK START GUIDE ORCA 3D.....	28
FIGURA 23. VISTAS DEL CASCO EN <i>RHINOCEROS</i>	29
FIGURA 24. PUNTOS DE REFERENCIA FIJADOS EN <i>MAXSURF</i>	32
FIGURA 25. TRANSFORMACIÓN PARAMÉTRICA EN <i>MAXSURF</i>	33
FIGURA 26. HIDROSTÁTICAS EN <i>MAXSURF</i>	33
FIGURA 27. SECCIONES TRANSVERSALES DEL CASCO EN <i>MAXSURF</i>	34
FIGURA 28. LÍNEAS DE AGUA EN <i>MAXSURF</i>	34
FIGURA 29. CURVA DE ÁREAS SECCIONALES EN <i>MAXSURF</i>	35
FIGURA 30. DESCOMPOSICIÓN RESISTENCIA AL AGUA.....	36
FIGURA 31. EQUILIBRIO DE FUERZAS SAVITSKY - FUENTE APUNTES HIDRODINÁMICA.....	39
FIGURA 32. DATOS PARA EL ANÁLISIS DE RESISTENCIA AL AVANCE EN <i>MAXSURF RESISTANCE</i>	40
FIGURA 33. MOTOR IPS800/950 – FUENTE: PÁGINA WEB DE VOLVO-PENTA.....	46
FIGURA 34. ELECTRONIC VESSEL CONTROL – FUENTE: PÁGINA WEB DE VOLVO-PENTA.....	46
FIGURA 35. DISTANCIA CENTRO DEL MOTOR A CRUJÍA – FUENTE: <i>INSTALLATION, VOLVO PENTA IPS</i>	48
FIGURA 36. DISPOSICIÓN DE LOS MOTORES EN PERFIL.....	49
FIGURA 37. DISPOSICIÓN EN PLANTA DEL PROPULSOR Y SUS APOYOS.....	49
FIGURA 38. DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS RECOMENDADA. FUENTE: <i>INSTALLATION, VOLVO PENTA IPS</i>	50
FIGURA 39. DISPOSICIÓN EN PLANTA DE LOS MAMPAROS TRANSVERSALES.....	50
FIGURA 40. DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS LONGITUDINALES FUENTE: <i>INSTALLATION, VOLVO PENTA IPS</i>	51
FIGURA 41. DISPOSICIÓN INDICATIVA MAMPAROS LONGITUDINALES.....	51
FIGURA 42. DISPOSICIÓN DE TANQUES EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	52

FIGURA 43. CUBIERTAS INFERIORES EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	53
FIGURA 44. PLATAFORMA DE BAÑO EN <i>RHINOCEROS</i>	53
FIGURA 45. ACOMODACIÓN CUBIERTA INFERIOR EN <i>AUTOCAD</i>	54
FIGURA 46. PERFIL DE LA EMBARCACIÓN EN <i>AUTOCAD</i>	55
FIGURA 47. ACOMODACIÓN CUBIERTA SUPERIOR EN <i>AUTOCAD</i>	56
FIGURA 48. DIVISION DE PANELES EN <i>RHINOCEROS</i>	58
FIGURA 49. DATOS GENERALES DE LA EMBARCACIÓN SCT R18	59
FIGURA 50. DATOS LAMINADO DE EJEMPLO SCT R18	60
FIGURA 51. DIMENSIONES DEL PANEL H1B EN CATIA V5	61
FIGURA 52. DIMENSIONES DEL PANEL H1B EN CATIA V5	61
FIGURA 53. PARA REFUERZOS RECOMENDADOS POR VOLVO— FUENTE — MANUAL DE INSTALACIÓN IPS900	69
FIGURA 54. SECUENCIA DE LAMINADO RECOMENDADA POR VOLVO— FUENTE — MANUAL DE INSTALACIÓN IPS900	69
FIGURA 55. LAMINADO EN SECCIÓN PARA SOPORTES DEL MOTOR— FUENTE — MANUAL DE INSTALACIÓN IPS900	70
FIGURA 56. PERFIL DE LA EMBARCACIÓN TRAS LAS MODIFICACIONES PARA MEJORAR EL TRIMADO EN AUTO CAD	75
FIGURA 57. DISTRIBUCIÓN COCINA EN AUTO CAD	75
FIGURA 58. CALCULO DESPLAZAMIENTO EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	76
FIGURA 59. CASO DE MÁXIMA CARGA EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	77
FIGURA 60. CRITERIOS DE ANÁLISIS IMO REALIZADOS EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	78
FIGURA 61. CURVA DE ESTABILIDAD ESTÁTICA PARA CONDICIÓN DE MÁXIMA CARGA EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	78
FIGURA 62. CASO DE SALIDA DE PUERTO EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	79
FIGURA 63. CURVA DE ESTABILIDAD ESTÁTICA PARA CONDICIÓN CASO DE SALIDA DE PUERTO EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	79
FIGURA 64. CASO DE REGRESO A PUERTO EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	80
FIGURA 65. CASO DE REGRESO A PUERTO EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	80
FIGURA 66. ALTURA REQUERIDA DE INUNDACIÓN — ISO 12217-1	81
FIGURA 67. ÁNGULO MÍNIMO DE INUNDACIÓN — ISO 12217-1	82
FIGURA 68. CASO DE CARGA LC1 EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	83
FIGURA 69. CASO DE CARGA LC2 EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	83
FIGURA 70. ÁNGULO DE ESCORA EN EQUILIBRIO MÁXIMO SEGÚN ESLORA — ISO 12217-1	83
FIGURA 71. RESULTADOS DE ENSAYO DE CARGA DE COMPENSACIÓN DE CARGA LC1 EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	84
FIGURA 72. RESULTADOS DE ENSAYO DE CARGA DE COMPENSACIÓN DE CARGA LC1 EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	84
FIGURA 73. RESULTADOS DE ENSAYO VIENTO Y OLAS EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	85
FIGURA 74. RESULTADOS DE ENSAYO DE ESTABILIDAD CON OLAS EN <i>MAXSURF STABILITY</i>	86
FIGURA 75. RESUMEN DE LAS DEFINICIONES DE LAS CATEGORÍAS DE DISEÑO — ISO 12217-1	87

Listado de Tablas

TABLA 1. REGRESIONES ESTUDIADAS.....	8
TABLA 2. DIMENSIONES INICIALES	16
TABLA 3. DIMENSIONES ESTUDIO VS MODELO CREADO EN <i>RHINOCEROS</i>	29
TABLA 4. DIMENSIONES INICIALES	35
TABLA 5. ESTIMACIÓN DE POTENCIA EN <i>MAXSURF RESISTANCE</i>	41
TABLA 6. ESTIMACIÓN DE POTENCIA EN <i>EXCEL</i>	42
TABLA 7. ESPECIFICACIONES SISTEMA DE PROPULSIÓN	47
TABLA 8. CAPACIDAD TANQUES	52
TABLA 9. PRESIONES DE DISEÑO Y ESPESORES MÍNIMOS DE CADA PANEL	63
TABLA 10. MATERIALES DEL LAMINADO	64
TABLA 11. SECUENCIA LAMINADO FONDO	66
TABLA 12. SECUENCIA LAMINADO COSTADO	67
TABLA 13. SECUENCIA LAMINADO ESPEJO EN SANDWICH	68
TABLA 14. SECUENCIA LAMINADO CUBIERTA.....	68
TABLA 15. ESPECIFICACIONES DEL LAMINADO DE LOS REFUERZOS	70
TABLA 16. PESO DEL CASCO SIN REFUERZOS	71
TABLA 17. PESO EN ROSCA DE LA ESTRUCTURA	73
TABLA 18. PESO EN ROSCA DE MAQUINARIA Y MOBILIARIO.....	74
TABLA 19. PESO EN ROSCA Y POSICIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD	74
TABLA 20. POSICIÓN DE EQUILIBRIO CASO DE MÁXIMA CARGA	78
TABLA 21. POSICIÓN DE EQUILIBRIO CASO DE SALIDA DE PUERTO.....	79
TABLA 22. POSICIÓN DE EQUILIBRIO CASO DE REGRESO A PUERTO.....	80

Listado de Gráficos

GRÁFICO 1. REGRESIÓN ESLORA TOTAL VS ESLORA CON PLATAFORMA	8
GRÁFICO 2. REGRESIÓN ESLORA CON PLATAFORMA VS ESLORA SIN PLATAFORMA.....	9
GRÁFICO 3. REGRESIÓN ESLORA SIN PLATAFORMA VS ESLORA EN FLOTACIÓN	10
GRÁFICO 4. REGRESIÓN ESLORA CON PLATAFORMA VS MANGA MÁXIMA.....	10
GRÁFICO 5. REGRESIÓN ESLORA SIN PLATAFORMA VS CALADO	11
GRÁFICO 6. REGRESIÓN ESLORA EN FLOTACIÓN VS PUNTAL	12
GRÁFICO 7. REGRESIÓN ESLORA CASCO VS DESPLAZAMIENTO	12
GRÁFICO 8. REGRESIÓN MANGA VS VELOCIDAD	13
GRÁFICO 9. REGRESIÓN ESLORA CASCO VS POTENCIA	14
GRÁFICO 10. REGRESIÓN ESLORA EN FLOTACIÓN VS PUNTAL	14
GRÁFICO 11. REGRESIÓN ESLORA CASCO VS TANQUE DE AGUA	15
GRÁFICO 12. TRIMADO DINÁMICO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD EN MAXSURF RESISTANCE	41
GRÁFICO 13. TRIMADO DINÁMICO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD EXCEL.....	43
GRÁFICO 14. RESISTENCIA AL AVANCE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD	43
GRÁFICO 15. RESISTENCIA AL AVANCE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD	44
GRÁFICO 16. ELECTRONIC VESSEL CONTROL – FUENTE: BROCHURE IPS950 DE LA WEB DE VOLVO-PENTA	47
GRÁFICO 17. CURVA GZ PARA ENSAYO DE BALANCE <i>MAXSURF STABILITY</i>	85
GRÁFICO 18. CURVA GZ PARA ENSAYO DE ESTABILIDAD CON OLAS <i>MAXSURF STABILITY</i>	86

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Objetivo y motivación

El objetivo de este trabajo se centra en la proyección de una embarcación de recreo de 17,5 metros de eslora de tipo monocasco construida en materiales compuestos. Se busca que la embarcación tenga un diseño elegante y deportivo y que sea razonablemente eficiente.

Se pretende que la embarcación sea capaz de alcanzar una velocidad de más de treinta nudos en condición de planeo o semiplaneo y tenga una velocidad de crucero cercana a veinticinco nudos. Se estudiará obtener los requisitos para la categoría de diseño A para que pueda navegar en cualquier zona de navegación.

Antes de comenzar el proceso de diseño se realizará un estudio estadístico sobre los datos de embarcaciones similares para obtener relaciones dimensionales que permitan tomar unos valores iniciales para la nueva embarcación. Además, la observación de los distintos diseños existentes servirá de inspiración. Podremos encontrar distintas soluciones aplicables al diseño de la embarcación de este proyecto.

Para desarrollar las distintas fases del proyecto se realizarán hojas de cálculo con el programa *Microsoft Excel*, además de herramientas de dibujo asistido por ordenador como *AutoCAD*, *Catia V5* y *Rhinoceros 6*. La mayoría de simulaciones y análisis se realizan en la *suite* de *Maxsurf*. Para estimar las presiones de diseño y realizar el escantillonado se usa el software *SCT R18*.

La motivación personal del desarrollo de este estudio recae en el amplio abanico de temas relacionados con la ingeniería naval que abarca. El objetivo es calibrar los conocimientos adquiridos en el transcurso del grado tanto a nivel teórico como práctico, lo que en cierta manera resulta ser una autoevaluación. La conclusión servirá para enfocar mi futura trayectoria académica, a fin conocer mis debilidades y de mejorar mis conocimientos y habilidades.

1.2 Método de estudio.

El diseño de una embarcación es un proceso complejo compuesto por varias fases. Para abordarlo se procede a utilizar la metodología de la espiral de diseño. Este proceso consiste en disponer las fases principales en el orden en el que se van a ir desarrollando. El objetivo de esta metodología consiste en realizar un procedimiento cíclico e iterativo, de forma que con cada vuelta de espiral el diseño obtenido se vaya optimizando y se vaya acercando a un resultado lo más óptimo posible.

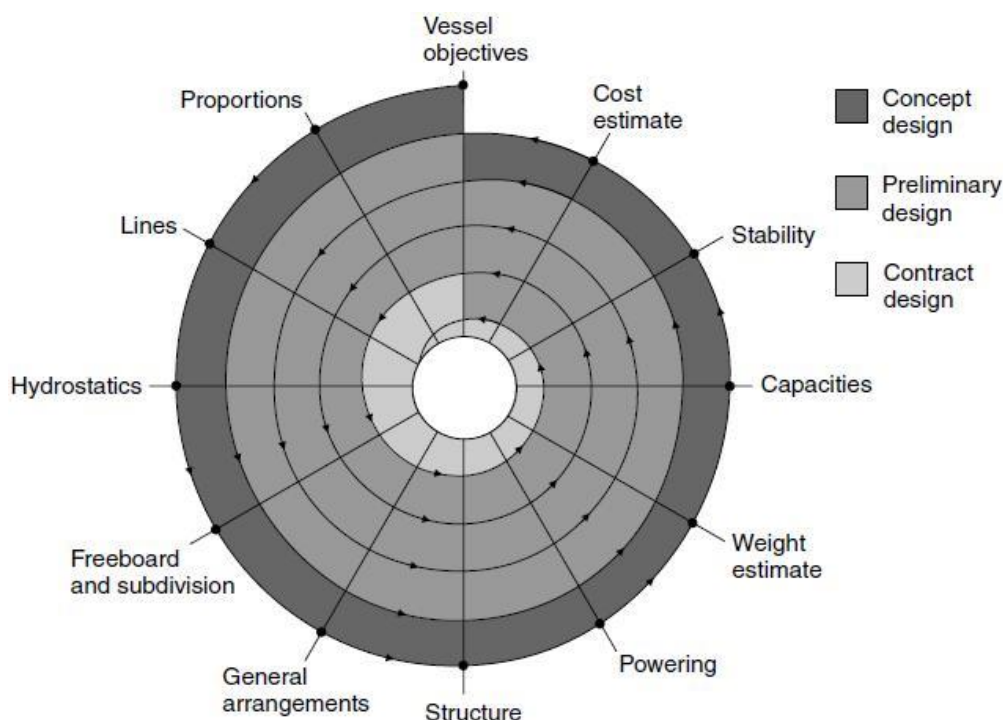


Figura 1. Espiral de diseño – <http://arquitecturabuque.blogspot.com/2011/07/introduccion-la-construccion-del-buque.html>

Encontramos tres fases principales en el proyecto de una embarcación: el conceptual, el contractual y el de construcción. El proyecto conceptual corresponde a la primera fase y tiene como objetivo verificar la viabilidad del mismo y definir las especificaciones de diseño. El contractual se centra en aportar el soporte técnico necesario para realizar el contrato de construcción. Por último, el proyecto de detalle o de construcción consiste en el desarrollo de la documentación técnica necesaria para la fabricación final de la embarcación.

En este estudio se incluye el proyecto contractual, concretamente la fase inicial conocida como proyecto preliminar. En consecuencia, deberán definirse de forma suficientemente precisa las principales características de la embarcación que permitan en un futuro un contrato de construcción. Para el desarrollo del proyecto se realiza la primera vuelta de espiral, que corresponde al anteproyecto de la embarcación.

La espiral de diseño para este proyecto se divide en siete fases, que van desde el anteproyecto y el diseño preliminar, en el que se determinan las dimensiones y las características principales para iniciar el diseño. Es decir, la creación de la geometría del casco y sus apéndices, la disposición general, la estimación de la resistencia y la elección del sistema propulsivo, hasta el dimensionamiento del escantillado, la estimación de pesos y los cálculos de estabilidad.

Según la importancia que se le quiera dar a cada fase, se entrará más o menos en detalle. En cualquier caso, para comprobar la viabilidad del diseño será imprescindible desarrollar mínimamente todas ellas. En cada una de las fases del proyecto se establecerán unos objetivos con los que cumplir. De esta forma, se pretende realizar las iteraciones necesarias para conseguir un diseño preliminar. En la conclusión se expondrán las consideraciones a tomar en la segunda vuelta de la espiral.

1.3 Consideraciones iniciales

La embarcación a proyectar es una embarcación de uso recreativo, por lo que se busca una buena habitabilidad interior y que sea fácil de manejar. Dado que las dimensiones de la embarcación son contenidas, se supone que se dedicará principalmente a cortas travesías costeras. Sin embargo, se pretende que la embarcación tenga una buena reserva de estabilidad que permita navegar con cierto confort incluso en condiciones de navegación adversas.

Las principales especificaciones de diseño para el barco que se va a proyectar son las siguientes:

- Embarcación de tipo monocasco.
- Construcción con materiales compuestos.
- Diseño elegante y deportivo.
- Embarcación planeadora.
- Velocidad de crucero en torno a 25 nudos.
- Velocidad máxima superior a 30 nudos.
- Autonomía mínima de 350 mn.
- Alojamiento amplio para 6 pasajeros y capacidad para un total de 8 personas a bordo.
- Categoría de diseño A y zonas de navegación 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

Capítulo 2. Diseño preliminar

En este capítulo se define la nomenclatura a seguir en todo el proyecto y se describe el estudio de mercado a partir del cual, mediante un análisis estadístico de los datos, da pie a las relaciones que permiten obtener unas dimensiones de partida.

2.1 Nomenclatura y definiciones básicas

Para realizar este proyecto se sigue la Norma EN ISO 8666:2016 Pequeñas embarcaciones, Datos Principales. Esta norma describe la forma en que se deben medir las dimensiones principales, Las masas y volúmenes y las condiciones de carga en embarcaciones de menos de 24 metros de eslora. A continuación, se definen las dimensiones principales que se seguirán en el estudio de mercado según la normativa vigente.

2.1.1 Mediciones longitudinales

Eslora Máxima (L_{\max})

La eslora total o máxima, también llamada LOA “length over all” en inglés, hace referencia a la longitud comprendida entre los planos tangentes a la parte más a proa y más a popa de la embarcación. La medición se realiza paralela a la línea de flotación.

Todo elemento en la embarcación que sea fijo se incluye en esta medición, a excepción de los motores fuera-borda y de cualquier equipo que se pueda desmontar sin la ayuda de herramientas.

Eslora del casco (L_H)

Esta eslora se mide igual que la anterior, con la diferencia que se deben excluir todos los elementos que se puedan desmontar sin afectar a la integridad estructural de la embarcación. Por poner ejemplos, no deben incluirse timones, guarniciones de proa o soportes para el ancla, las protecciones ni las plataformas. Se puede apreciar la diferencia de esta medida con la eslora máxima en la figura 2.

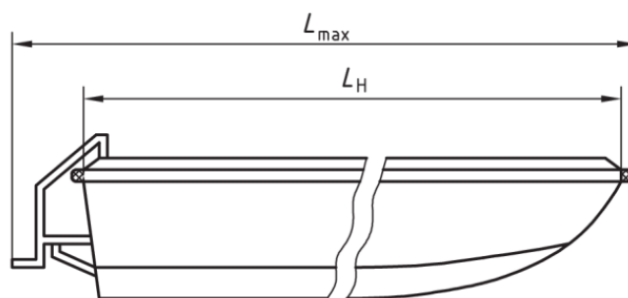


Figura 2. L_{\max} y L_H para monocasco (fuente Norma EN ISO 8666 página 12)

Eslora de flotación (L_{wl})

La eslora en la flotación para cada condición de carga y el asiento de diseño se mide entre el plano más a proa que intersecta con la roda y el plano de flotación hasta el plano más a popa de la intersección del casco con el plano de flotación.

2.1.2 Mediciones transversales

Manga máxima ($B_{máx}$)

La manga máxima o total hace referencia a la mayor distancia entre los extremos transversales de la embarcación. Para esta medición se tienen en cuenta todas las partes estructurales que integran la embarcación, como juntas casco/cubierta, extensiones del casco, defensas y barandillas que sobresalen de los costados.

Manga del Casco (B_H)

La manga del casco incluye todas las partes estructurales que integra la embarcación. Deberán excluirse de la medición todos los elementos que se puedan desmontar de forma no destructiva y mantengan la integridad estructural del casco.

Manga en la flotación (B_{WL})

La manga en flotación se define como la distancia máxima entre la intersección de la superficie del casco con el plano de flotación para una condición de carga concreta.

2.1.3 Mediciones verticales

Puntal Máximo ($D_{máx}$)

El puntal máximo se debe medir como la distancia vertical entre la línea de cubierta en la mitad de la eslora de flotación y el punto más bajo de la quilla.

Calado

El calado de una embarcación puede variar en función de la carga, por ello se define un calado máximo ($T_{máx}$) y un calado mínimo ($T_{mín}$). El calado máximo es la distancia entre la línea de flotación y el punto más bajo del casco o los apéndices y orzas desplegadas en la posición más baja. El calado mínimo se mide con las partes móviles en la posición más elevada.

Altura Libre

La altura libre es la distancia vertical entre la parte superior del suelo de la cabina y la cara inferior del techo o cubierta. En pequeñas embarcaciones esta distancia es de gran importancia para una buena habitabilidad.

2.1.4 Otros datos

Astilla muerta (β)

La astilla muerta es el ángulo, en grados, de la superficie del fondo de la embarcación y la horizontal. La medición debe hacerse transversalmente, en una posición concreta. Debido a que hay distintos tipos de fondos, en la figura 3 se exponen las distintas formas de medirlos y la fórmula para obtener el ángulo de astilla muerta (β).

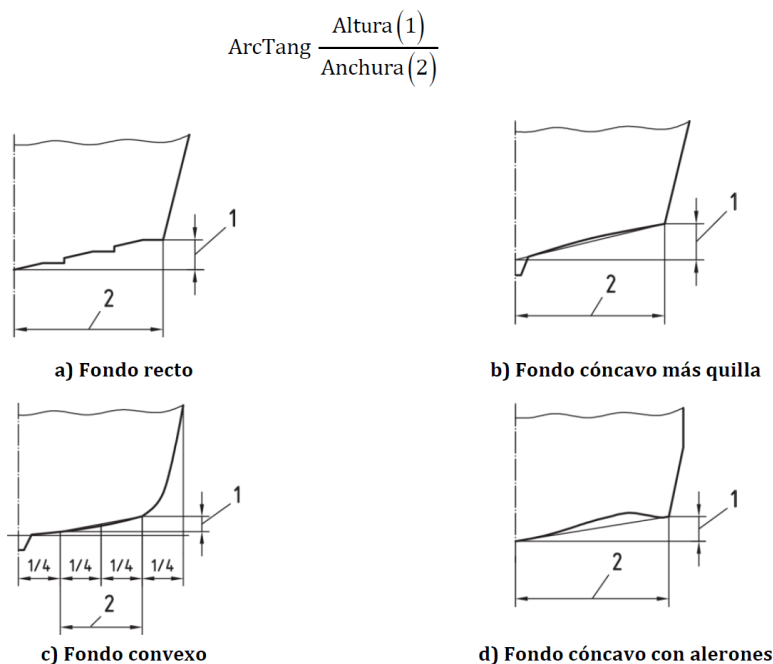


Figura 3. Determinación de la astilla muerta (fuente Norma EN ISO 8666 página 18)

2.2 Estudio de mercado

Con el objetivo de realizar un estudio estadístico, se han recogido datos de 70 embarcaciones de recreo producidas en los últimos cinco años con la capacidad de navegar a más de treinta nudos y con una filosofía de uso o diseño similar a la embarcación a proyectar. Se han escogido distintos modelos de hasta veinte astilleros distintos, priorizando aquellos con mayor información publicada para facilitar el posterior análisis de datos.

Los parámetros para formar la base de datos inicial son los siguientes:

- Eslora total
- Manga máxima
- Calado
- Desplazamiento
- Potencia
- Velocidad de crucero
- Velocidad máxima
- Tanque de combustible
- Tanque de agua dulce

Algunos de estos datos pueden estar medidos de distinta forma y normalmente no se especifica cómo se han tomado las medidas. Se asume que se han hecho de la misma forma, ya que la variación no es significativa para el estudio de las dimensiones preliminares.

Para estudiar las dimensiones necesitaríamos más datos de las embarcaciones, pero los fabricantes no suelen compartir más información que la anteriormente comentada. Por esta razón se requiere obtener las dimensiones necesarias a través de un escalado 2D a partir de las dimensiones conocidas y los perfiles

de las embarcaciones. Este método introduce un error en los datos obtenidos y por ello deberemos considerar las dimensiones obtenidas como orientativas.

Las dimensiones que se analizan con este método son las siguientes:

- Eslora del casco en flotación
- Eslora del casco sin plataforma
- Eslora del casco con plataforma
- Puntal

2.3 Estudio estadístico

Tras finalizar la recolección de los datos anteriormente comentados se procede a realizar su análisis. Para este cometido se realiza un estudio mediante regresiones lineales entre las dimensiones de la base de datos. El objetivo principal es encontrar relaciones dimensionales que permitan obtener unas dimensiones preliminares.

Una regresión lineal es un modelo matemático que representa una aproximación de la dependencia entre la variable dependiente “Y” y la variable independiente “X”. Al analizar los valores de dos variables mediante una regresión lineal se obtiene un diagrama de dispersión de puntos, una recta de regresión lineal y el coeficiente de determinación “ R^2 ”.

El coeficiente de determinación expresa, con valores entre 0 y 1, en qué proporción varían los valores en el modelo matemático y, por tanto, la calidad de la predicción definida por la recta de regresión lineal. Por otro lado, el coeficiente de correlación de Pearson “R” expresa, con valores entre -1 y 1, la relación que existe entre las variables “X” e “Y”.

En definitiva, para el estudio mediante regresiones lineales se consideran las relaciones con un coeficiente de correlación lineal “R” mayor o igual a 0,8 que representa una correlación positiva fuerte.

Regresiones	Coeficiente de correlación R	Regresiones	Coeficiente de correlación R
$L_{\max} = f(B_{\max})$	0,9052	$D = f(T)$	0,7715
$L_H(\text{Plat}) = f(L_{\max})$	0,9968	$\Delta = f(L_H(\text{Plat}))$	0,9148
$L_{H(S.\text{Plat})} = f(L_H(\text{Plat}))$	0,9849	$\Delta = f(L_{WL})$	0,9088
$L_{WL} = f(L_H(\text{Plat}))$	0,9780	$\Delta = f(B_{\max})$	0,9040
$L_{WL} = f(L_{H(S.\text{Plat})})$	0,9824	$\Delta = f(D)$	0,8818
$B_{\max} = f(L_H(\text{Plat}))$	0,9184	$V_{\max} = f(L_H(\text{Plat}))$	0,0387
$B_{\max} = f(L_{H(S.\text{Plat})})$	0,9118	$V_{\max} = f(B_{\max})$	0,1034
$B_{\max} = f(L_{WL})$	0,9199	$V_{\max} = f(D)$	0,0006
$T = f(L_{H(S.\text{Plat})})$	0,8616	$P = f(L_H(\text{Plat}))$	0,8150
$T = f(L_{WL})$	0,8478	$P = f(B_{\max})$	0,7439
$T = f(B_{\max})$	0,8350	$P = f(D)$	0,7568

$D = f(L_{H(W.Plat)})$	0,8931	$F_T = f(L_{H(Plat)})$	0,8915
$D = f(L_{WL})$	0,9037	$W_T = f(L_{H(Plat)})$	0,8525
$D = f(B_{max})$	0,8809		

Tabla 1. Regresiones estudiadas

Tras optimizar las regresiones, desestimando las embarcaciones que más se alejan de las regresiones lineales, quedan cincuenta y siete barcos entre 13,6 y 23,25 metros de eslora. Las mangas máximas están entre 4,01 y 5,75 metros. La velocidad máxima de la mayoría se sitúa en torno a los 30 nudos, con algunas que superan incluso los 40 nudos. En general están construidas con materiales compuestos y utilizan dos motores para la propulsión principal.

2.3.1 Eslora total – Eslora con plataforma

En general, el dato que dan los fabricantes para la eslora hace referencia a la eslora total. Como el objetivo es realizar el dimensionamiento preliminar del casco de la embarcación, se necesitan las cotas propias del casco. En este caso, la regresión del gráfico 1 permite hacer una buena aproximación de la eslora del casco con plataforma.

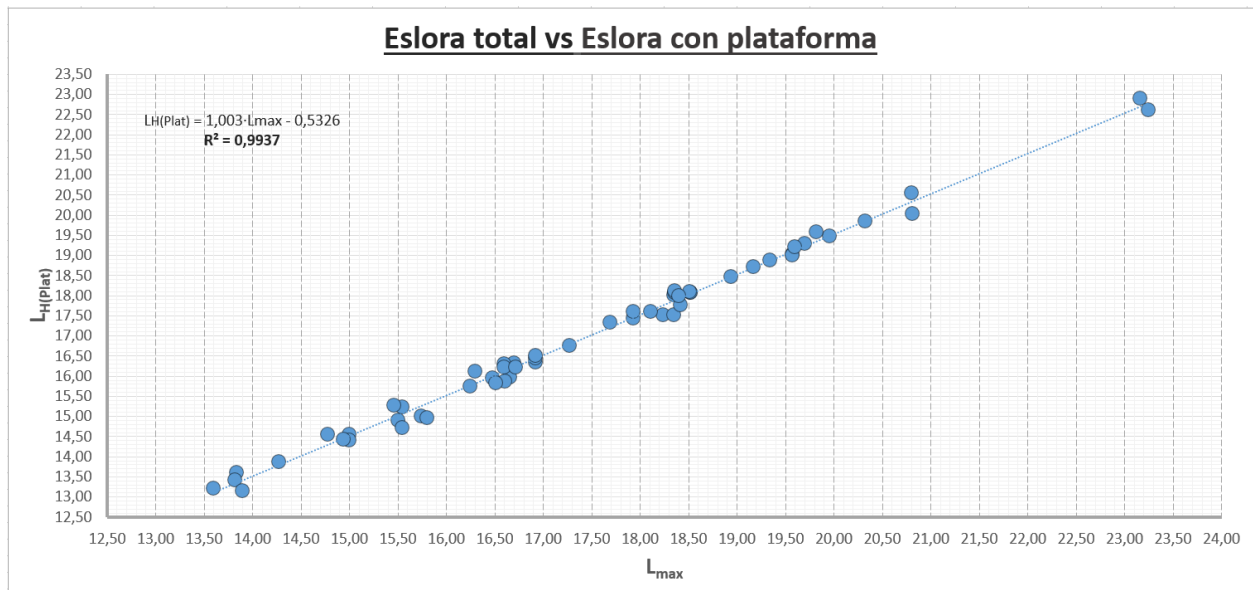


Gráfico 1. Regresión eslora total vs eslora con plataforma

$$L_{H(Plat)} = 1,003 \times L_{max} - 0,5326$$

$$R = 0,997$$

Partiendo de una eslora total de 17,5 metros se obtiene la eslora del casco con plataforma.

$$L_{H(Plat)} = 1,003 \times (17,5) - 0,5326$$

$$L_{H(Plat)} = \mathbf{17,02 \text{ m}}$$

2.3.2 Eslora con plataforma – Eslora sin plataforma

Una vez calculada la eslora con plataforma, se procede a obtener la eslora del casco sin plataforma. De esta forma se averigua, también, cual es la longitud de la plataforma respecto el total de la eslora del casco.

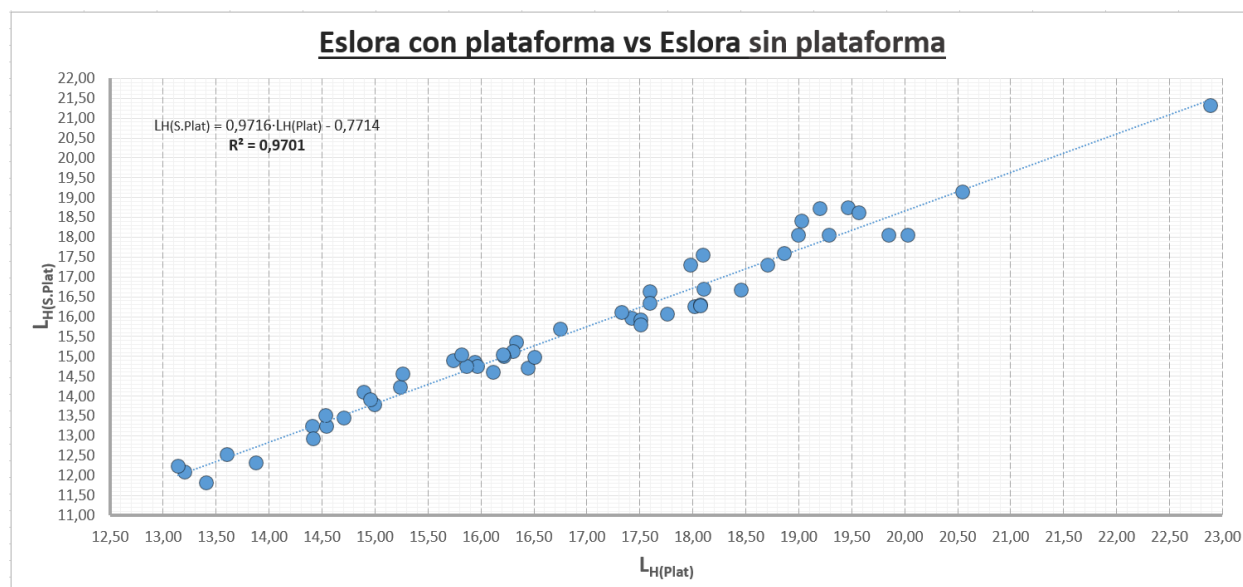


Gráfico 2. Regresión eslora con plataforma vs eslora sin plataforma

$$L_{H(S.Plát)} = 0,9716 \times L_{H(Plat)} - 0,7714$$

$$R = 0,985$$

$$L_{H(S.Plát)} = 0,9716 \times (17,02) - 0,7714$$

$$L_{H(S.Plát)} = 15,77 \text{ m}$$

La eslora del casco sin plataforma es de 15,77 metros. Esta cota define la dimensión longitudinal principal del casco y por ello la modelización del casco se basará en esta longitud. Además, se puede obtener la longitud de la plataforma, que sería de 1,25 metros.

2.3.3 Eslora sin plataforma – Eslora en flotación

En embarcaciones rápidas las formas del casco en la línea de agua son fundamentales para garantizar un buen comportamiento y favorecer al planeo. Para poder ajustar las formas en la línea de agua se necesita la eslora en flotación en combinación con el calado. Se debe tener en consideración que la forma en que se hace la medición de la eslora de flotación para este estudio introduce un cierto error.

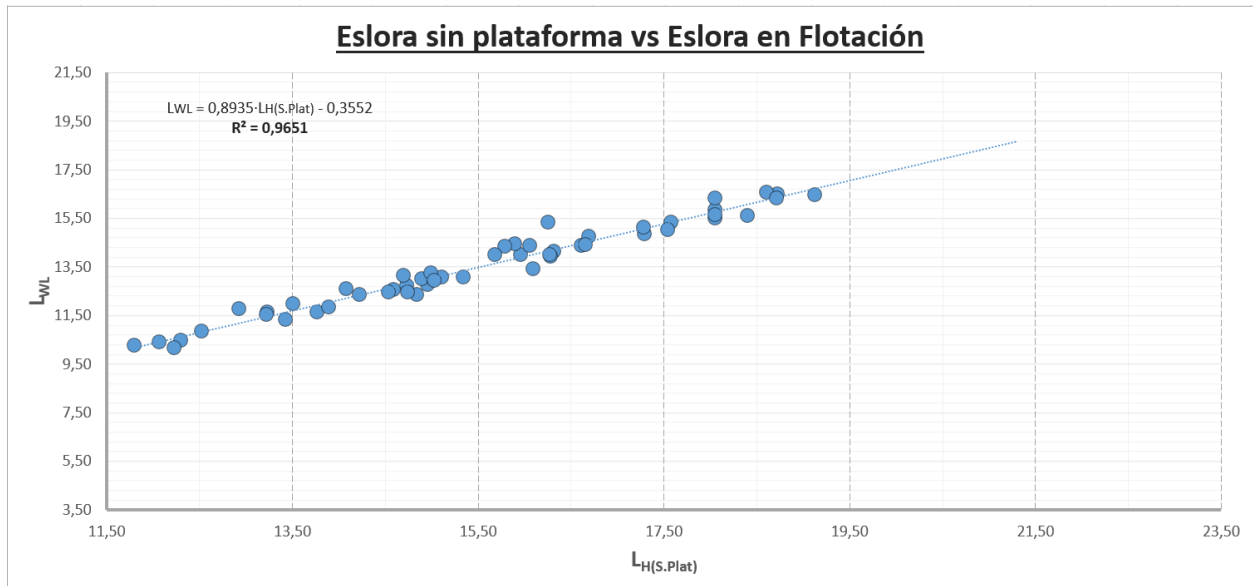


Gráfico 3. Regresión eslora sin plataforma vs eslora en flotación

$$L_{WL} = 0,8935 \times L_{H(S.Plát)} - 0,3552$$

$$R = 0,982$$

$$L_{WL} = 0,8935 \times (15,77) - 0,3552$$

$$L_{WL} = 13,73 \text{ m}$$

Partiendo de la eslora del casco sin plataforma se obtiene una eslora en flotación de 13,73 metros.

2.3.4 Eslora con plataforma – Manga máxima

Debido a la dificultad de obtener las distintas cotas transversales de las embarcaciones estudiadas se toma la manga facilitada por el fabricante. Generalmente el fabricante comparte la manga máxima de la embarcación únicamente. Esta dimensión será la única referencia transversal para iniciar el diseño.

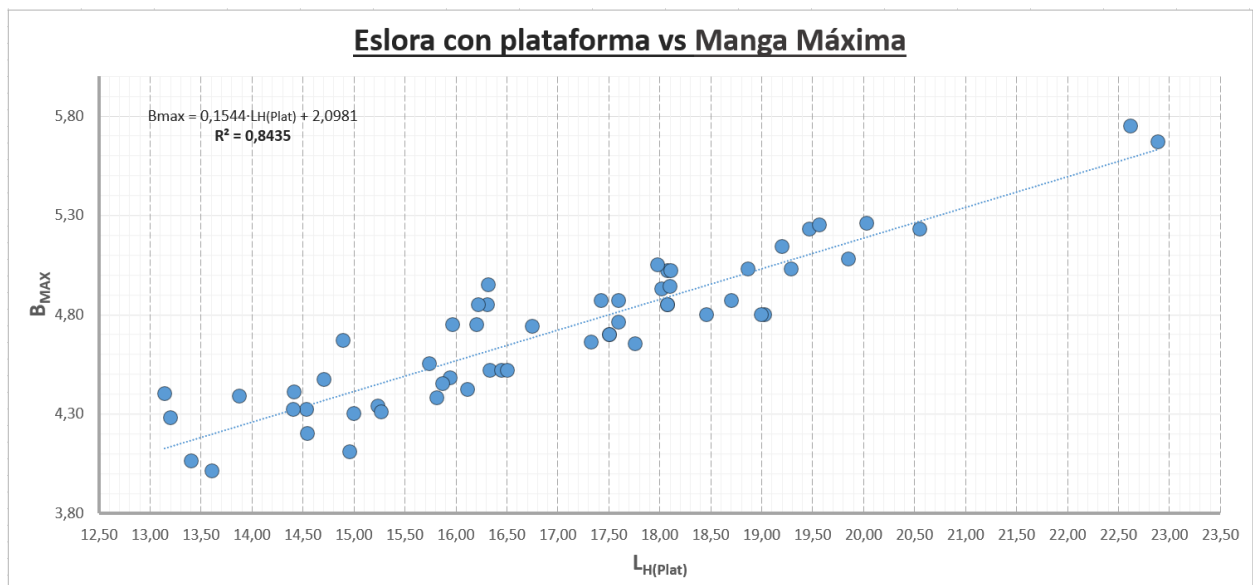


Gráfico 4. Regresión eslora con plataforma vs manga máxima

$$B_{max} = 0,1544 \times L_{H(Plat)} + 2,0981$$

$$R = 0,918$$

$$B_{max} = 0,1544 \times (17,02) + 2,0981$$

$$B_{max} = 4,73 \text{ m}$$

A partir de la eslora del casco se obtiene una manga máxima de 4,73 metros. Esta dimensión fija la cota transversal máxima del paralelepípedo que contiene la embarcación. La manga máxima “ B_{max} ” puede coincidir con la manga del casco “ B_H ” en algunas embarcaciones, mientras que en otras puede haber diferencia. Por esta razón, de cara al diseño del casco tomaremos la manga calculada de forma orientativa.

2.3.5 Eslora sin plataforma – Calado

El calado de la embarcación es importante para el diseño de embarcaciones planeadoras. Las formas que se encuentran en la línea de flotación deben aportar sustentación y estabilidad para que la embarcación pueda empezar el planeo y mantenerlo.

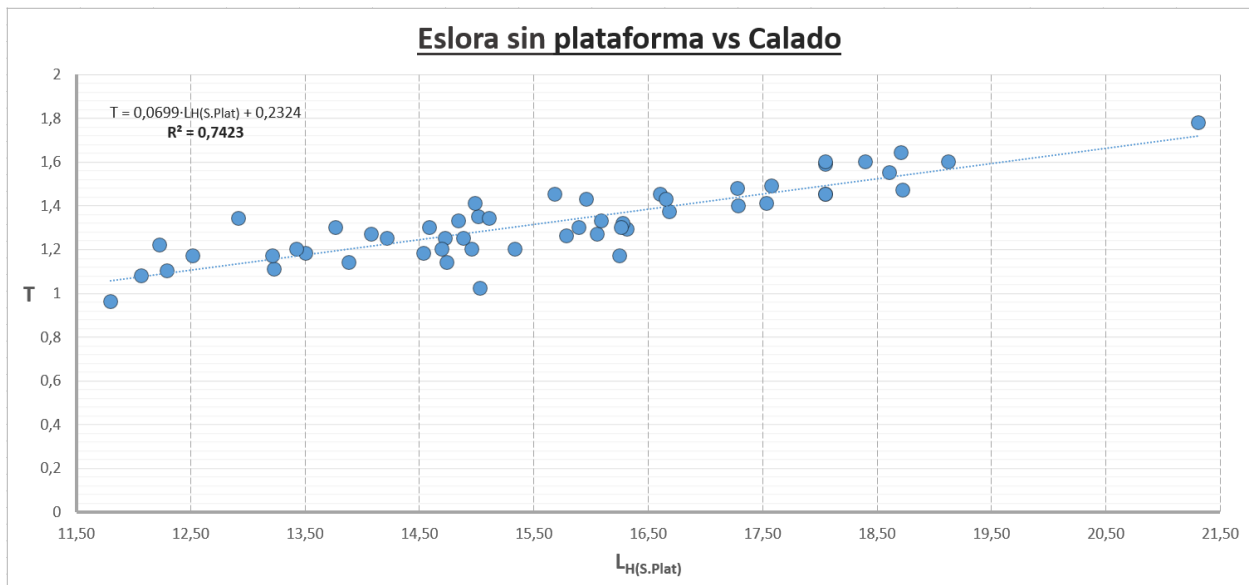


Gráfico 5. Regresión eslora sin plataforma vs calado

$$T = 0,0699 \times L_{H(S.Plát)} + 0,2324$$

$$R = 0,862$$

$$T = 0,0699 \times (15,77) + 0,2324$$

$$T = 1,33 \text{ m}$$

A partir de la eslora del casco sin plataforma se obtiene un calado de 1,33 metros.

2.3.6 Eslora en flotación – Puntal

El puntal de la embarcación hace referencia a la altura de la cubierta principal en el punto medio del barco. Esta cota será importante para la habitabilidad interior.

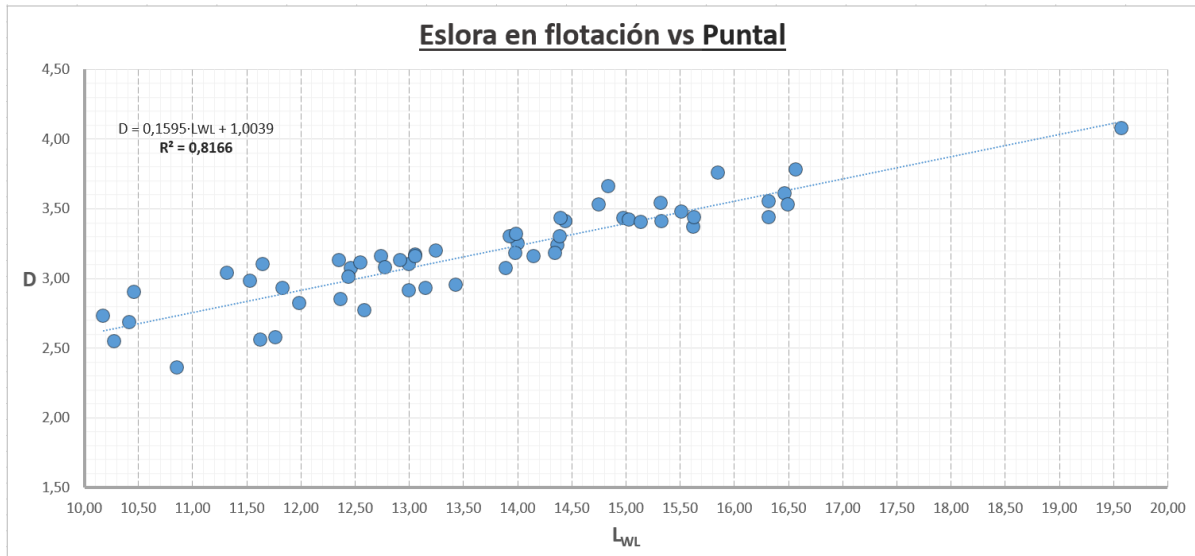


Gráfico 6. Regresión eslora en flotación vs puntal

$$D = 0,1595 \times L_{WL} + 1,0039$$

$$R = 0,904$$

$$D = 0,1595 \times (13,73) + 1,0039$$

$$D = 3,19 \text{ m}$$

A partir de la eslora en flotación se obtiene el puntal de la embarcación. Sería de 3,19 metros. Con esta cota y el calado podremos obtener el francobordo.

2.3.7 Eslora casco – Desplazamiento

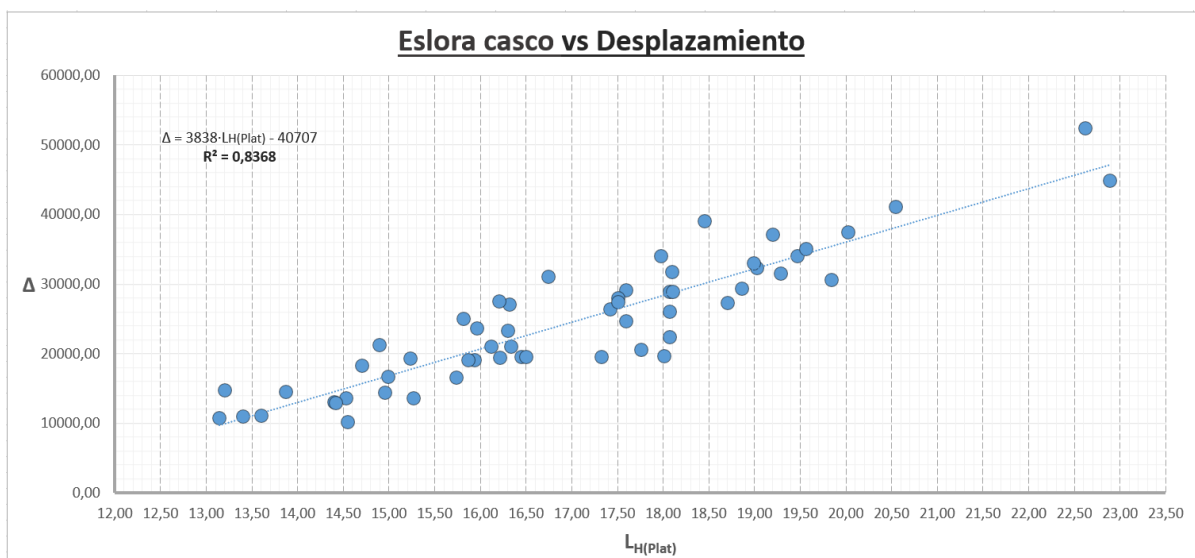


Gráfico 7. Regresión eslora casco vs desplazamiento

$$\Delta = 3838 \times L_{H(Plat)} - 40707$$

$$R = 0,915$$

$$\Delta = 3838 \times (17,02) - 40707$$

$$\Delta = 24615,76 \text{ kg}$$

2.3.8 Manga – Velocidad

La regresión escogida para estimar la velocidad mediante la manga máxima tiene un coeficiente de determinación de 0,0107 y un coeficiente de Pearson de 0,103. En consecuencia, de igual forma que el resto de regresiones estudiadas para calcular la velocidad, no se puede afirmar que la estimación sea del todo fiable.

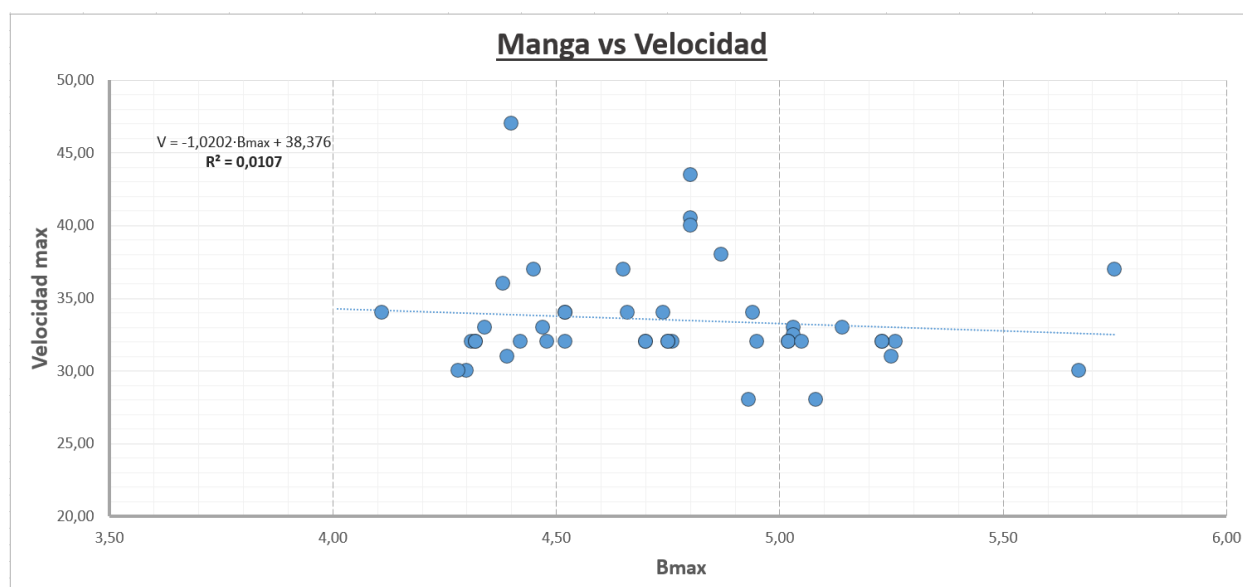


Gráfico 8. Regresión manga vs velocidad

$$V_{max} = -1,0202 \times B_{max} + 38,376$$

$$R = 0,103$$

$$V_{max} = -1,0202 \times (4,73) + 38,376$$

$$V_{max} = 33,55 \text{ kn}$$

La velocidad máxima calculada con la regresión anterior corresponde a 33,55 nudos. Como se ha expresado, esta estimación será únicamente un valor indicativo. En cualquier caso, 33,55 nudos se encuentran dentro de las posibilidades del proyecto y se estudiará la viabilidad de que la embarcación pueda alcanzar esa velocidad.

2.3.9 Eslora casco – Potencia

Las potencias totales de los motores propulsores en una embarcación rápida determinan, en parte, la velocidad máxima que puede alcanzar la embarcación. Para estimar la potencia se usa la regresión entre la eslora del casco y la potencia. En la regresión del gráfico 9 la potencia figura en kW.

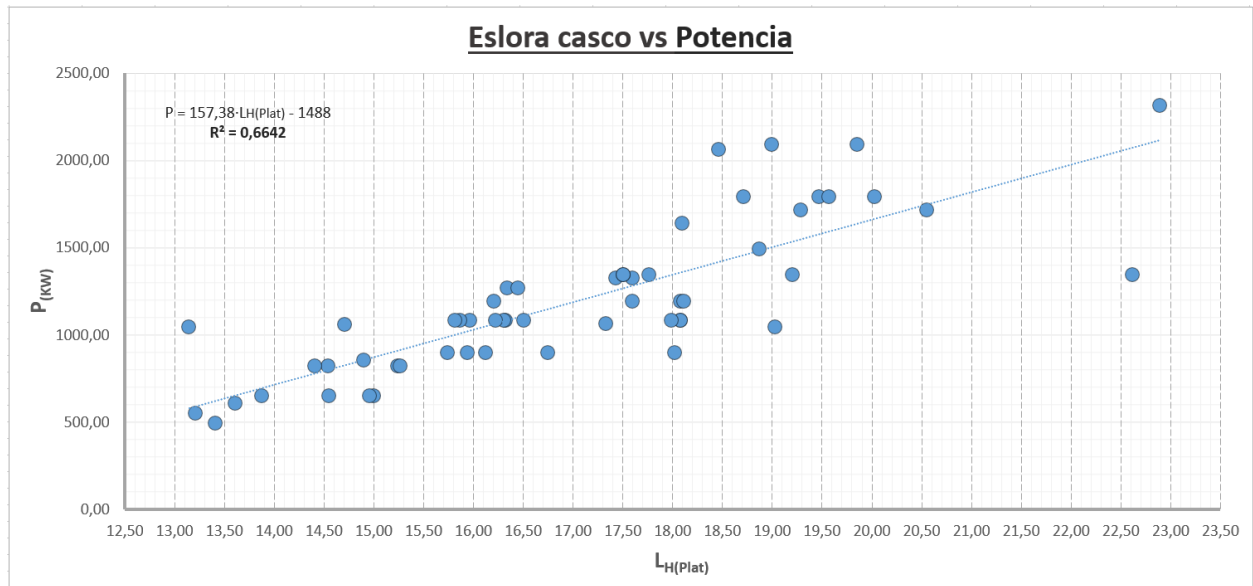


Gráfico 9. Regresión eslora casco vs potencia

$$P = 157,38 \times L_{H(Plat)} - 1488$$

$$R = 0,815$$

$$P = 157,38 \times (17,02) - 1488$$

$$P = 1190,59 \text{ kW}$$

$$P = 1596,23 \text{ CV}$$

La estimación de la potencia total de los motores propulsores es de 1190 kW o 1596 CV. Hay que tener en cuenta que estos valores son una estimación y por tanto la potencia a instalar se estudiará en profundidad en el capítulo dedicado a la resistencia al avance y al cálculo de la potencia.

2.3.10 Eslora casco – Tanque de combustible

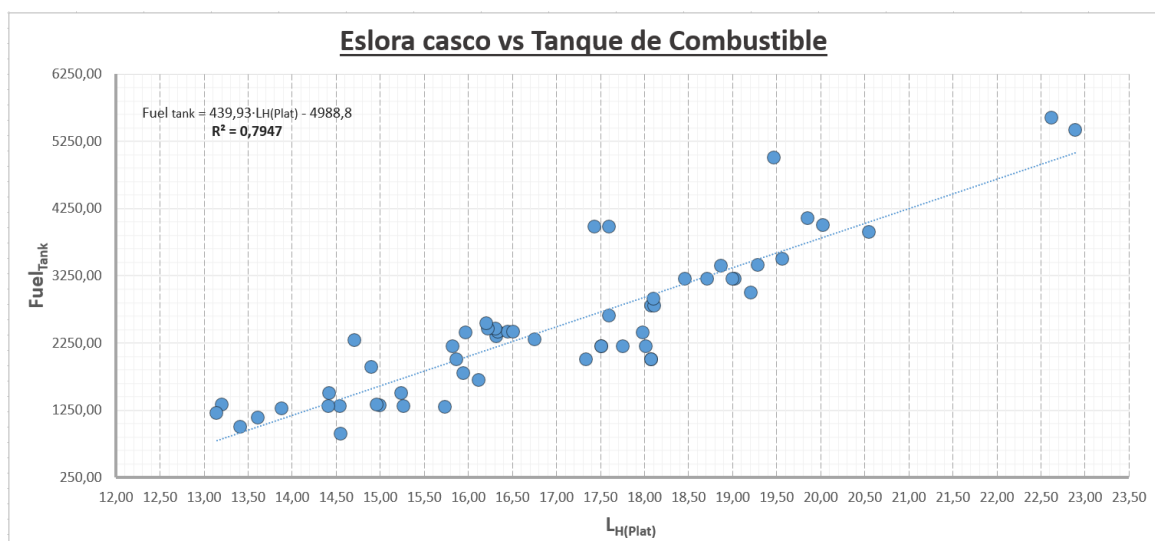


Gráfico 10. Regresión eslora en flotación vs puntal

$$F_{tank} = 439,93 \times L_{H(Plat)} - 4988,8$$

$$R = 0,891$$

$$F_{tank} = 439,93 \times (17,02) - 4988,8$$

$$F_{tank} = 2498,76 \text{ l}$$

Partiendo de la eslora del casco, se estima que la capacidad del tanque de combustible es de 2498,76 litros. Esta aproximación será útil para el diseño del sistema propulsivo, aunque habrá que ajustar la capacidad en función del espacio disponible y de la autonomía que se fije como objetivo.

2.3.11 Eslora casco – Tanque de agua

Por último, se estima el volumen del tanque de agua dulce a partir de la eslora del casco.

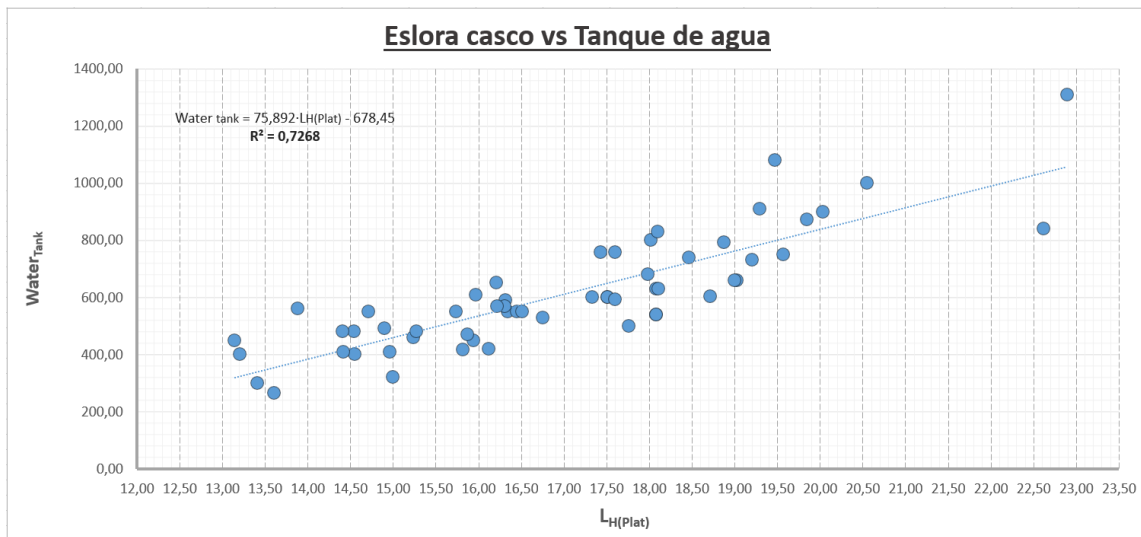


Gráfico 11. Regresión eslora casco vs tanque de agua

$$W_{tank} = 75,892 \times L_{H(Plat)} - 678,45$$

$$R = 0,853$$

$$W_{tank} = 75,892 \times (17,02) - 678,45$$

$$W_{tank} = 613,22 \text{ l}$$

El volumen calculado mediante la regresión lineal es de 613,22 litros. Este valor será un punto de partida para el dimensionamiento del sistema de agua sanitaria. En el capítulo dedicado a la disposición general se estudiará si la capacidad calculada es viable según el reparto de los espacios o incluso puede aumentarse.

2.4 Dimensiones preliminares

Como se ha comentado en los apartados anteriores del estudio de regresiones lineales, hay que tener en cuenta que las dimensiones principales y parámetros de la embarcación calculados anteriormente son estimaciones a partir de un estudio estadístico. En consecuencia, los valores calculados son un punto de

partida para el diseño de las formas del casco. El resultado final del estudio estadístico de las cincuenta y siete embarcaciones escogidas son las dimensiones preliminares para el proyecto que se muestran en la tabla 2.

Dimensiones Iniciales			
Eslora total L_{\max}	17,50 m	Calado de diseño T	1,33 m
Eslora casco con plataforma $L_{H(\text{Plat})}$	17,02 m	Desplazamiento de diseño Δ	24.615,38 Kg
Eslora casco sin plataforma $L_{H(\text{S.Plat})}$	15,77 m	Velocidad máxima V_{\max}	33,55 kn
Eslora flotación L_{WL}	13,73 m	Tanque combustible $\text{Fuel}_{\text{Tank}}$	2.498,76 l
Manga máxima B_{\max}	4,73 m	Tanque agua dulce $\text{Water}_{\text{Tank}}$	613,22 l
Puntal de diseño D	3,19 m	Potencia P	1.596,23 CV

Tabla 2. Dimensiones Iniciales

Capítulo 3. Diseño de Formas

En este capítulo se procede al diseño de la geometría del casco a partir de las dimensiones preliminares obtenidas en el capítulo anterior, junto a los criterios y especificaciones de diseño para embarcaciones planeadoras. Posteriormente se analizan las formas obtenidas inicialmente para optimizarlas y validar su viabilidad.

3.1 Criterios para el diseño de una embarcación

En primer lugar debemos determinar qué tipo de embarcación vamos a proyectar. Como el propósito es diseñar una embarcación planeadora, debemos verificar que efectivamente lo sea. Una forma sencilla de comprobarlo es seguir el criterio que define la norma ISO-12215-5. En el apartado 3.8, dentro de los términos i definiciones, se especifica que una embarcación es planeadora si cumple la siguiente expresión:

$$\frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} \geq 5 \rightarrow \frac{33,55}{\sqrt{13,73}} = \mathbf{9,054}$$

Tras el cálculo vemos que la embarcación cumple la condición, por lo que deberemos considerar los criterios de diseño para una embarcación planeadora. Son un conjunto de recomendaciones y parámetros que se han recopilado a lo largo del tiempo por investigadores y diseñadores de embarcaciones.

A continuación, se analizarán los distintos criterios para embarcaciones de planeo y semi-planeo. El objetivo de revisar los parámetros clave para el diseño de esta clase de embarcaciones es tenerlos en consideración y encontrar un buen equilibrio entre las formas de planeo y el resto de características que debe tener la embarcación para cumplir con las especificaciones de diseño.

3.1.1 Semiángulo de entrada en la línea de flotación

El semiángulo de entrada en la línea de flotación es el ángulo que define la intersección del plano donde se encuentra el área de flotación y la línea de crujía en la roda. Un ángulo pronunciado en este punto de la carena puede provocar un desprendimiento de capa en el fluido volviendo el flujo turbulento. Como consecuencia, aumentaría la resistencia viscosa. Además este ángulo influye en las secciones de proa y la curva de áreas seccionales. Se puede estimar el ángulo máximo recomendado con la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{125,67 \times B_{max}}{L_{H(S.Plat)}} - 162,25 \times C_p^2 + 234,32 \times C_p^3 + 0,1551 \times \left[X_{CC} + 6,8 \times \frac{(T_A - T_F)}{T} \right]^3$$

Si tomamos las dimensiones preliminares de la embarcación, y suponemos el calado es constante en toda la eslora podemos calcular el ángulo.

$$\alpha = \mathbf{36,412^\circ}$$

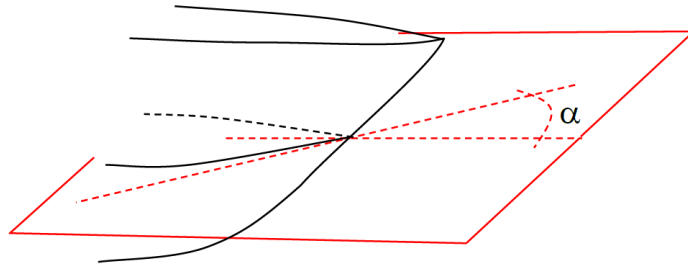


Figura 4. Semiángulo de entrada en la línea de flotación – Fuente: Diseño y optimización de formas

3.1.2 Ángulo de la roda con el plano de flotación

El ángulo que describe la roda con el plano de flotación influye en el cabeceo y el embarque de agua del barco. Es recomendable que el ángulo sea de entre 15 y 30 grados, de forma que el ángulo de entrada del agua sea constante y permita una mayor zona de calados. En el caso de que el abanico sea excesivo las olas generan momentos tortores elevados en esta zona de la carena, además de incrementar la resistencia al avance por olas rompientes.

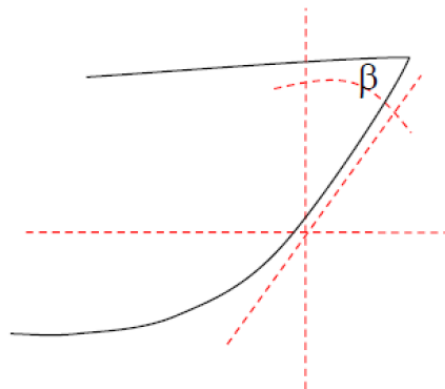


Figura 5. Ángulo de la roda con el plano de flotación – Fuente: Diseño y optimización de formas

3.1.3 Formas seccionales

Otra consideración que debemos tomar para el diseño de las formas en proa es la disposición de las secciones en “U” o “V”. Para una embarcación planeadora se escogen las formas en “V” por las siguientes ventajas:

- Mayor manga en flotación, aumenta la estabilidad del buque.
- Menor superficie mojada.
- Buen comportamiento en la mar gracias a una mayor reserva de flotabilidad y menor probabilidad de dar pantocazos.
- Mayor superficie en cubierta.

En cuanto al trazado de la zona de popa, las formas en “U” o “V” tienen también gran importancia e influyen sobre todo en el rendimiento propulsivo. En primer lugar, influyen en el fenómeno de separación de la capa límite en el flujo y, por tanto, en la resistencia por fricción. En segundo lugar, el rendimiento de los propulsores depende de cómo de homogénea sea la estela. Cuanto más limpio sea el flujo, mejor. Para el diseño de las secciones de la carena en popa se deben considerar los siguientes puntos:

- Dar suficiente inmersión a las hélices.
- Disponer los huelgos mínimos entre hélice, codaste y timón. Las sociedades de clasificación tienen requisitos mínimos de seguridad para este punto.
- Con el objetivo de reducir la separación del flujo se recomienda que el trazado al final de las líneas de agua se haga sin que el semiángulo supere los 30° .
- Igualmente, el trazado al final de los cortes paralelos a la crujía es recomendable que no supere los 30° respecto a la horizontal. Si es posible, 15° o menos son recomendables para esta zona y cualquier corte vertical en las formas.
- En caso de disponer una popa de estampa con un $F_n > 0.5$ se recomienda que el espejo esté sumergido entre un 15 % y un 20 % del calado total. La popa de estampa produce una reducción considerable en la resistencia por formación de olas debido a la interacción entre trenes de olas proa – popa.
- Además, en buques con $F_n > 0.5$, suele haber un *flap* bajo el espejo que permite reducir el trimado dinámico de la embarcación.

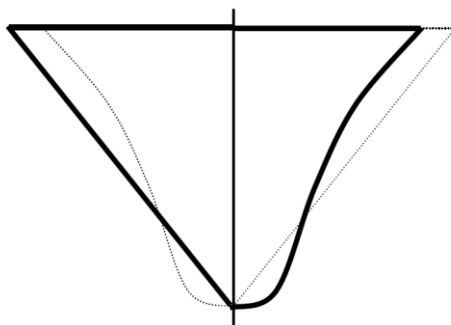


Figura 6. Formas seccionales de proa en V y U – Fuente: Diseño y optimización de formas

3.1.4 Curvas de áreas seccionales

Una vez consideradas las formas de las secciones de proa y popa, debemos asegurar que la evolución de las secciones a lo largo de la eslora sea suave. En el caso de que no se cumpla esta suavidad en la curva, las formas producirán resistencia de origen viscoso y aumentará la resistencia al avance.

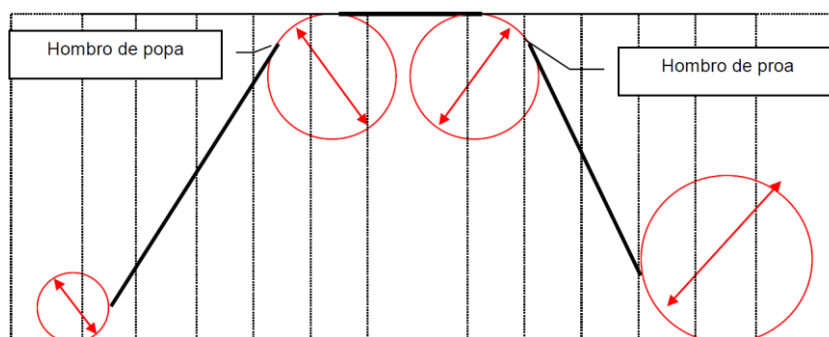


Figura 7. Curva de áreas seccionales típica – Fuente: Diseño y optimización de formas

3.1.5 Fondo de la embarcación

Las embarcaciones que se consideran planeadoras son aquellas que se mueven a una velocidad suficiente para elevarse sobre la ola de proa que producen ellas mismas, de manera que avanzan en una posición inclinada. Esta inclinación depende del empuje hidrodinámico, que a su vez depende de la velocidad, de las formas del casco y de su incidencia con el agua.

El fondo de una embarcación puede ser plano, cóncavo o convexo. Cada tipo de fondo interactúa de forma distinta con el agua y genera una determinada distribución de presiones. El efecto neto de la distribución de presiones resulta en una fuerza F , aplicada en el centro de presiones de la distribución. Esta fuerza se puede descomponer en el empuje ($L=F \cdot \cos(\theta)$) y la resistencia por presión ($R=F \cdot \sin(\theta)$). En las figuras 8, 9 y 10 se muestra la distribución de presiones para fondo plano, cóncavo y convexo, respectivamente.

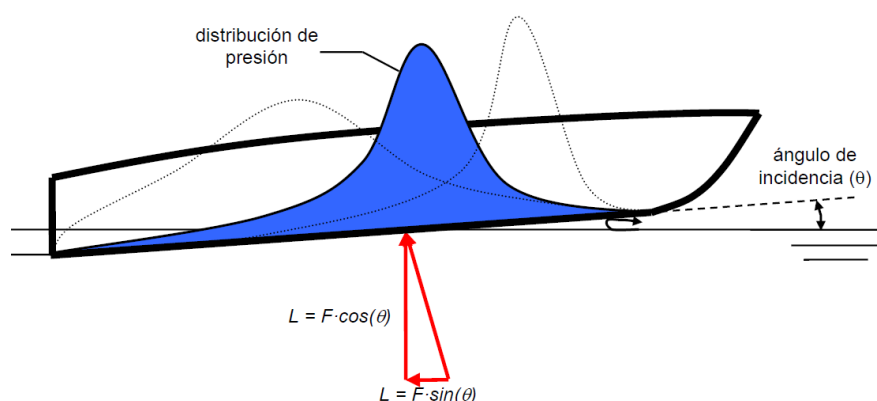


Figura 8. Distribución de presiones tipo en fondo plano – Fuente: Hidrodinámica

En un fondo plano la distribución de presiones tiene su máxima presión aproximadamente en el punto de remanso de la línea de corriente correspondiente. El ángulo de triando final dependerá de esta posición del centro de presión dinámica.

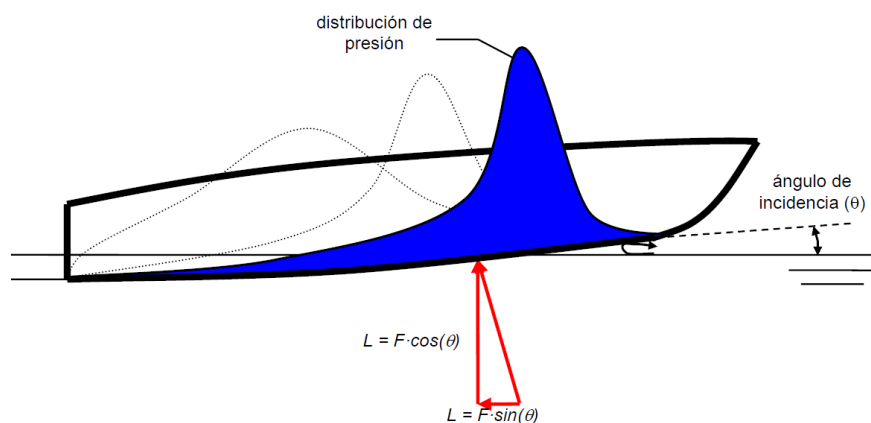


Figura 9. Distribución de presiones tipo en fondo cóncavo – Fuente: Hidrodinámica

En la distribución de presiones en un fondo cóncavo se aprecia que el punto de presión máxima queda adelantado, como el centro de presiones. Además, la distribución de las presiones se encuentra menos repartida a lo largo de la eslora y se concentra en la zona de presión máxima. Este hecho hace que la embarcación sea muy sensible a las variaciones del ángulo de incidencia, que afecta considerablemente al trimado. En definitiva, esta configuración puede producir inestabilidad con la aparición de cabeceo (*porpoising*) a altas velocidades.

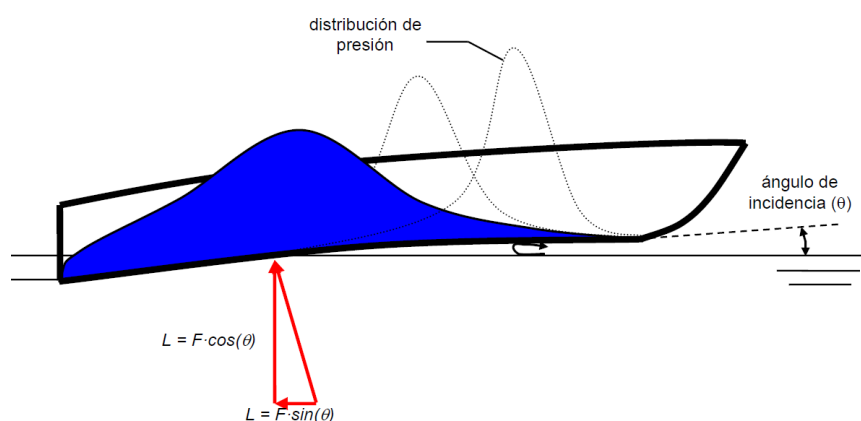


Figura 10. Distribución de presiones tipo en fondo convexo – Fuente: Hidrodinámica

En la distribución de presiones para un fondo convexo encontramos la situación opuesta a la anterior. El pico de presión máxima se encuentra retrasado. La presión se distribuye en buena parte de la eslora, de forma que la presión máxima se reduce. El efecto en este caso es un trimado menor y, por tanto, mayor superficie mojada a igualdad de velocidad. A nivel dinámico la embarcación puede tener inestabilidad lateral, con pérdida de control y un cabeceo poco estable.

En cuanto a las secciones horizontales de la embarcación, partiendo de la base de que las formas serán en V, como ya se ha comentado anteriormente, encontramos tres opciones de diseño. En las figuras 11, 12 y 13 se muestra el área mojada para formas en V rectas, Formas V con ligera concavidad y Formas V con ligera convexidad, respectivamente.

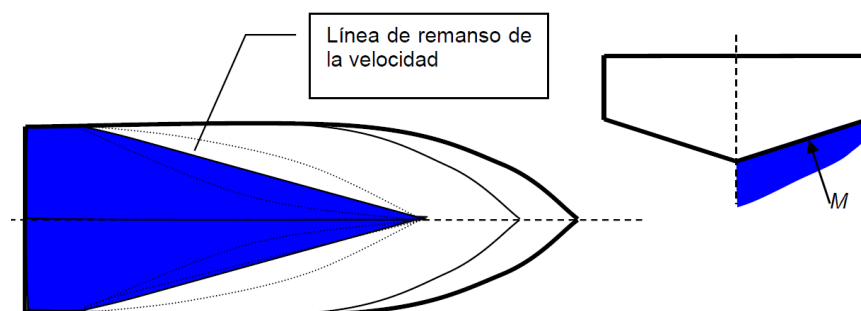


Figura 11. Formas V rectas – Fuente: Hidrodinámica

Para formas en V rectas la distribución de presiones presenta una línea de remanso de la velocidad. En consecuencia, los picos de presión serán suaves. Para estas formas la fuerza del empuje dinámico tendrá una componente horizontal significativa que, unida a la sustentación vertical que genera el empuje, creará un momento que mejorará la estabilidad.

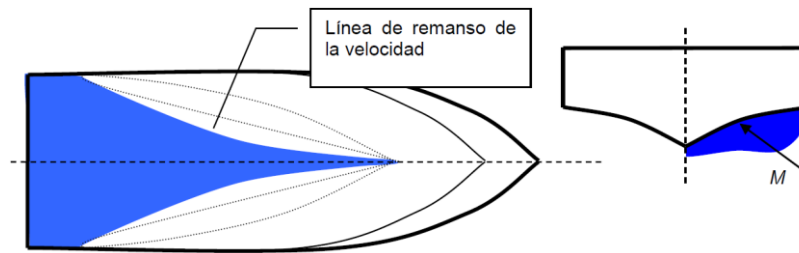


Figura 12. Formas V con ligera concavidad – Fuente: Hidrodinámica

En cuanto a las formas en V con ligera concavidad, se produce un mayor empuje hacia la popa, progresivamente. Esto contribuye a un menor empuje global por lo que, debido a la posición retrasada del centro de presiones, el trimado dinámico disminuye. Por otro lado, las formas en V con ligera convexidad producen un mayor empuje global que conduce a una reducción de la superficie mojada a medida que aumenta la velocidad. En definitiva, las formas en V con ligera convexidad serán útiles para una embarcación planeadora.

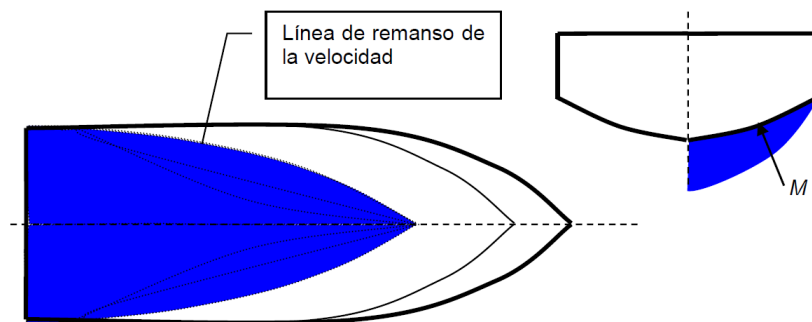


Figura 13. Formas en V con ligera convexidad – Fuente: Hidrodinámica

3.1.6 Ángulo de astilla muerta

Como se ha comentado en el anterior punto, las embarcaciones planeadoras tienen unas formas predominantes en V. Para definir esta clase de formas se analiza el ángulo de astilla muerta o *deadrise*. Este ángulo lo forman las cuadernas con la horizontal en crujía. En embarcaciones con estas formas el ángulo de astilla muerta tiene una función similar al que desempeña el coeficiente prismático en otros barcos, donde es un parámetro que influye principalmente en la sustentación y en la resistencia al avance.

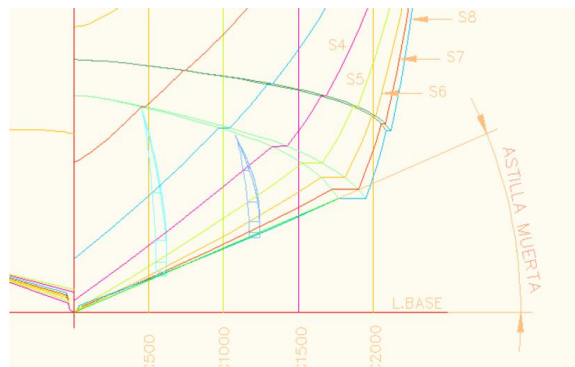


Figura 14. Ángulo de astilla muerta – Fuente: Diseño arquitectónico de buques a motor

Los valores de la astilla muerta muy bajos no se recomiendan, ya que el fondo de la embarcación sería prácticamente plano y por tanto inestable. En función de la velocidad, se recomiendan distintos ángulos medios de astilla a muerta, que varían entre 16° para $F_n < 1.0$ y entre 25° y 30° para $F_n > 2.5$. En general, el ángulo de astilla muerta en la cuaderna maestra será de entre 20° y 24° . En popa la astilla muerta disminuye ligeramente, mientras que hacia proa se incrementa de forma pronunciada.

3.1.7 Radenes

Los radenes o *spray rails* en inglés, son perfiles en forma de L dispuestos a lo largo de la carena. El objetivo de estos carriles es proporcionar sustentación y desviar el agua de las zonas de la carena, reduciendo así la superficie mojada. Además, estos perfiles pueden actuar como rigidizadores longitudinales y mejoran la estabilidad dinámica de la embarcación.

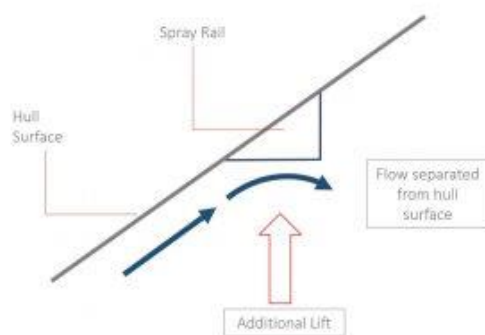


Figura 15. Sustentación de *spray rails* – Fuente: <https://www.totalsimulation.co.uk/spray-rails/>

3.1.8 Flaps

Como se ha comentado anteriormente que el trimado de la embarcación influye en la resistencia al avance debido a que cuanto más superficie de la carena este en contacto con el agua más potencia será necesaria para que el barco se desplace. Es importante que el trimado sea óptimo para cada situación de navegación, por ello se pueden disponer unos *flaps* en el espejo de popa que permiten modificar el trimado en cada momento para reducir la superficie mojada.



Figura 16. *Flaps* – Fuente: Diseño y optimización de formas

3.2 Obtención de formas

Para obtener las formas iniciales pueden utilizarse tres procedimientos principales o una combinación de los mismos, con el objetivo de encontrar unas formas que permitan obtener una baja resistencia al avance. Para ello hay que tener en cuenta que las formas deberán ser suaves para conseguir una baja resistencia de origen viscoso o fricción y que permitan el planeo o semi-planeo de la embarcación para una baja resistencia por formación de olas.

3.2.1 Derivación de formas

Este proceso para la obtención de las de las formas iniciales consiste en derivar las formas a partir de una embarcación conocida que se considere bien construida según los criterios de diseño iniciales. Ésta debe compartir la filosofía con la embarcación a diseñar y debe tener unas dimensiones parecidas para poder utilizar su geometría como base.

La derivación de formas se realiza con programas que permiten realizar transformaciones geométricas simples o complejas. Las transformaciones que permiten realizar estos programas son: cambios de dimensiones principales, modificar el coeficiente prismático manteniendo las dimensiones principales, modificar el coeficiente de bloque manteniendo el coeficiente de la maestra y las dimensiones principales o incrementar la longitud del cuerpo cilíndrico.

Estas transformaciones permiten mantener unas formas suaves. Conseguir unas formas que cumplan con los objetivos depende de la capacidad de aplicar iterativamente las transformaciones anteriores. Si en cambio se busca obtener unas formas en particular que se ajusten a un diseño conceptual anterior, este método no es el más indicado.

3.2.2 Generación de formas

El segundo método consiste en generar las formas a partir de los parámetros y dimensiones objetivo principales. Para modelar las formas será necesario disponer de herramientas informáticas específicas. Estas herramientas pueden ser generadores de formas analíticas 3D, generadores de formas analíticas 2D con alisado 3D o generadores de formas 3D con control de alisado.

Los generadores de formas analíticas 3D o paramétricos definen las formas con fórmulas matemáticas, esto nos permite generar formas lisas (*NURBS Lines*) con distintos puntos de control. La Limitación de estos programas es que no se pueden realizar todas las formas posibles. En el caso de los generadores de formas 2D con alisado 3D la precisión se reduce. Por último, los generadores de formas 3D con control de alisado como *Maxsurf* permiten obtener formas suaves tras transformaciones sobre la superficie.

3.2.3 Series sistemáticas de formas

El ultimo método para obtener las formas del buque consiste en seguir una serie sistemática de formas. Las series sistemáticas son estudios experimentales realizados por canales de ensayos o astilleros. Los resultados de estos estudios se expresan con parámetros básicos dimensionales. Para definir unas formas basadas en una serie sistemática deberemos conocer los parámetros principales de formas. Existen algunas series publicadas, por lo que se pueden usar algunas de las series para embarcaciones de planeo y semi-planeo.

Para semi-planeo se encuentran las series *50 Parent*, *MBK Series Parent* y *BK Subseries Parent* entre otras. Para planeo las *Dutch series 62 Parent*, las series *TMB 62* y las *Series 62 Parent* son de las más conocidas. A continuación, se muestra un modelo de las series 62-DUT para embarcaciones de planeo. Esta serie se desarrolló a finales de los años setenta con un ángulo de astilla muerta bajo.

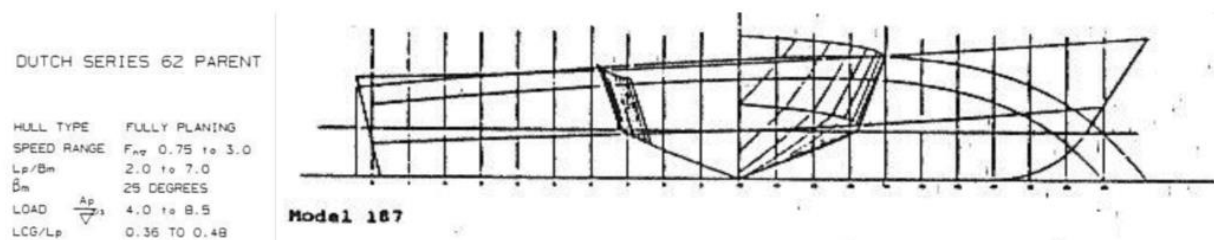


Figura 17. Series 62 Parent – Fuente: Anteproyecto

3.3 Diseño del casco

En este apartado se exponen los procesos a seguir para obtener las formas del casco de la embarcación. Para este proyecto se utiliza la geometría base de embarcación de planeo que ofrece el asistente de generación de cascos del *plug-in Orca3D* para *Rhinoceros*. Dentro del menú del asistente se introducen las dimensiones obtenidas en el estudio estadístico y se ajustan los coeficientes y ángulos dentro de los parámetros para embarcaciones rápidas.

Este procedimiento es interesante para diseñar un nuevo casco porque permite ver la geometría y los coeficientes hidrostáticos, que se recalculan con cada cambio de la geometría. También permite modificar los valores en el asistente para optimizar las formas y obtener unos coeficientes hidrostáticos deseados.

3.3.1 Modelización del casco

Primeramente, abrimos el asistente *Hull Assistant* y seleccionamos el modelo *Default Planning Hull Assistant*. Después, nos aparece una ventana con las pestañas *Dimensions*, *Shape* y *Angles*. Deberemos definir todos los parámetros dentro de cada pestaña para obtener las formas del casco que buscamos. A continuación se exponen la definición de las distintas dimensiones¹ y parámetros a introducir y el valor que se ha tomado en cada caso para el diseño del casco de la embarcación de este proyecto en particular.

¹ En cuanto a las unidades deberemos mantener el mismo criterio para todos los programas a utilizar. En este caso el archivo de Rhino se utilizarán las dimensiones en metros. Cuando se exporte la geometría a Maxsurf y AutoCad deberemos comprobar que las unidades y el centro de coordenadas concuerden.

Dimensiones:

- *Length on Deck*: (15,77 m) Para la eslora del casco en cubierta introducimos la eslora del casco sin plataforma obtenida en el estudio estadístico. Dado que la mayoría de embarcaciones analizadas en el estudio estadístico tenían unas formas de popa de estampa, la eslora del casco sin plataforma total o en cubierta no difiere.
- *Beam on Deck*: (4,73 m) La manga en cubierta equivale a la manga máxima, por lo que usaremos la obtenida en el estudio estadístico.
- *Deck Height @Bow*: (1,8 m) La altura de cubierta en proa desde la línea de flotación la podemos calcular restando el calado al puntal y el resultado es el francobordo de 1,83 m. Podemos visualizar la cota en el cálculo de parámetros hidrostáticos y ajustar la altura de cubierta hasta conseguir el valor calculado.
- *Deck Height @Transom*: (1,63 m) Por motivos estéticos, en la popa se ha escogido una altura inferior a la de proa.
- *Chine Height @Bow*: (0,2 m) La altura del codillo en proa hace referencia a la distancia a la que sale sobre la línea de flotación en la roda. Cuando la embarcación aumente su trimado el codillo quedará sobre la flotación, guiando el flujo de entrada. De todas formas, se deja parte del codillo expuesto con asiento nulo.
- *Keel Height @Transom*: (-1,33 m) Altura de la quilla en popa equivale al calado máximo en estas formas en concreto, por lo que introducimos el calado obtenido en el estudio preliminar. Dado que la referencia es la línea de flotación, el valor debe ser negativo.
- *Chine Width*: (0,18 m) De forma preliminar, se definen 18 centímetros para el ancho del codillo. Se busca un compromiso en las formas que permita una buena sustentación sin afectar a la habitabilidad interior.
- *Reference Height*: (0 m) La altura de referencia se deja en 0, de forma tengan sentido las cotas que se muestran en la guía rápida para el asistente de diseño del casco.

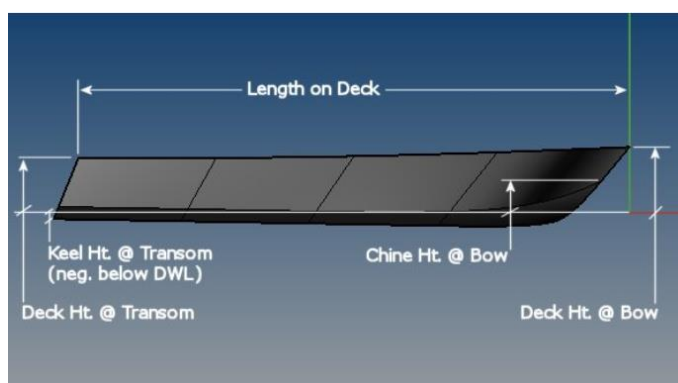


Figura 18. Dimensiones perfil – Fuente: Quick Start Guide Orca 3d

Formas:

- *Sheer Height*: (1) La altura de la regala afecta las formas de la cubierta. Para un valor de 0,9 la cubierta define una línea recta entre proa y popa. Para valores inferiores a 0,9 las formas de la cubierta serán cóncavas, mientras que para valores mayores a 0,9 las formas de cubierta serán convexas. Se ha introduce un valor de 1 para formas ligeramente convexas que permitan desalojar el agua que embarque en cubierta durante la navegación.

- **Sheer Height Position:** (0,55) La posición de la curva de la regala se define con este parámetro. A mayor valor más se acentúa la curva, modificando incluso la quilla y el costado de forma significativa. Se escoge un valor de 0,55 buscando que las formas se ajusten a las dimensiones objetivo.
- **Deck Beam @Transom:** (1) Este parámetro permite redondear las formas en popa, a base de reducir la manga en el codaste. Dado que se busca una popa de estampa, se ha dejado un valor de 1, por lo que no se reduce la manga en el espejo de popa.
- **Chine Beam @Transom:** (0,75) Este parámetro define la posición del codillo respecto a la mitad de la manga. Se debe escoger un valor de 0,75, que permite unas formas en V sin perder mucha habitabilidad.
- **Max Beam Position:** (0,5) La posición de la manga máxima se ha situado lo más retrasada posible, dejando unas formas finas en proa sin que estas lleguen a ser exageradas.

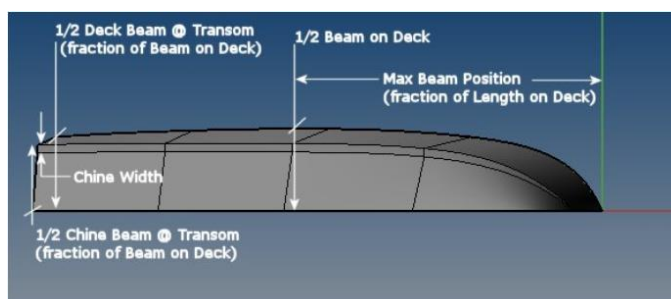


Figura 19. Formas de Fondo – Fuente: Quick Start Guide Orca 3d

- **Forefoot Shape:** (0,5) La curvatura de la roda viene definida por este valor. Con valor 0 se consigue una roda muy marcada i recta, mientras que con valor 1 la roda será suave y redondeada. Se busca una roda menos marcada para evitar altas presiones en esta zona que dificulten el planeo.
- **Bow Rounding:** (0) Para la popa, como se ha comentado en el apartado anterior, se buscan formas en V, por lo que los parámetros de forma que definen cómo de llenas serán las formas se dejan prácticamente a 0.
- **Bow Fullness:** (0,25) Define si las formas son llenas o finas. Se busca llenar las formas ligeramente sin llegar a cambiar la forma en V de la proa. De esta forma se consigue mejor habitabilidad.
- **Bow Twist:** (1) Este último parámetro de formas define un cambio en la curvatura longitudinal en la zona de proa. Esta manera crea una forma de S en el codillo, de manera que el flujo suba y baje en esta zona. Estas formas pueden incrementar la sustentación, pero deben estudiarse en profundidad, por lo que de momento se deja el valor de curvatura en 1.

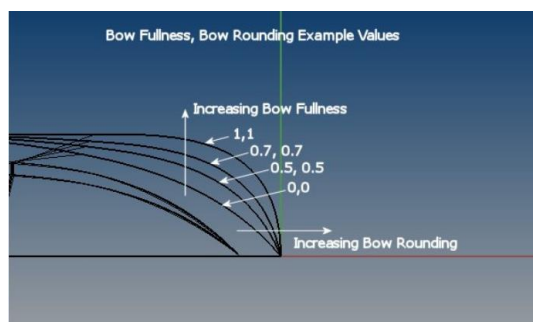


Figura 20. Formas llenas o finas en proa – Fuente: Quick Start Guide Orca 3d

Ángulos:

- **Bow Rake Angle:** (46°) Se recomienda que el ángulo de la roda con el plano de flotación no supere los 30 grados. Sin embargo, para esta embarcación se estudia el ángulo en barcos similares, donde se encuentran ángulos entre 46 y 51 grados. Se toma un ángulo dentro del rango comentado buscando que se mantengan las dimensiones objetivo.
- **Bottom Rocker:** (0°) El ángulo del fondo permite inclinar la quilla de forma que en proa se sitúe más alta o más baja que en popa. Se busca una quilla recta i paralela a la línea de flotación, por lo que se introduce un valor de 0 grados.

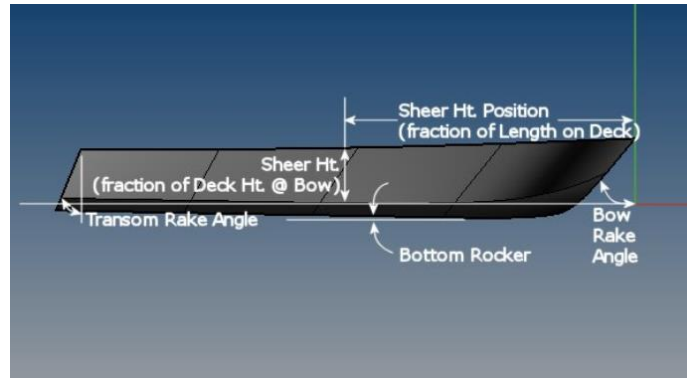


Figura 21. Ángulos Perfil – Fuente: Quick Start Guide Orca 3d

- **Transom Rake Angles:** (0°) El ángulo del espejo de popa respecto el plano de flotación permite inclinar la parte superior del espejo hacia proa. Esta inclinación ayuda a conseguir que el espejo quede perpendicular a la flotación cuando aumente el trimado en condición de planeo.
- **Transom Deadrise:** (16°) El ángulo de astilla muerta en popa influye en el efecto de empuje que proporciona la línea de codillo. Se toma un valor recomendado para embarcaciones rápidas.
- **Mid Deadrise:** (18°) El ángulo de astilla muerta medio contribuye a definir la evolución de la astilla muerta a lo largo de la eslora. Como se recomienda para estas embarcaciones, se toma un ángulo mayor al de popa.
- **Adjust Chine Transversaly/Vertically:** (V) El ajuste o referencia para la línea de codillo y el ángulo de astilla muerta se realiza verticalmente.

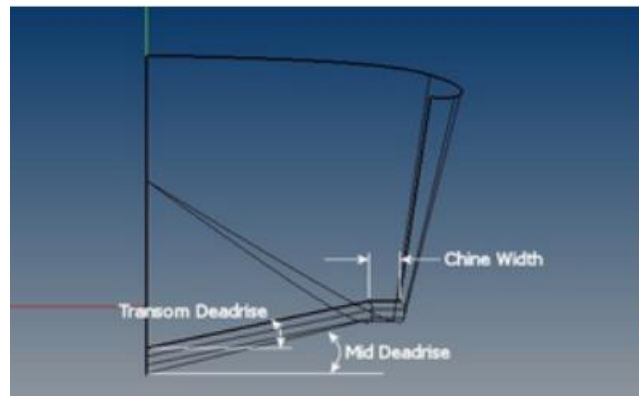


Figura 22. Parametros astilla muerta – Fuente: Quick Start Guide Orca 3d

Resultado:

Una vez se han definido todas las dimensiones, parámetros de forma y ángulos de la geometría, se procede a comprobar los parámetros hidrostáticos. Primeramente, se comprueba que se cumplan las dimensiones objetivo definidas por el estudio estadístico. En la tabla 3 se muestran las dimensiones del estudio junto a las dimensiones del modelo.

Como se puede comprobar, se consigue modelar el casco manteniendo las dimensiones del estudio. Se encuentra un valor excesivamente distante en cuanto al desplazamiento, por lo que debemos analizar la geometría. Por las formas de la geometría respecto a otras embarcaciones del estudio, se llega a la conclusión que el calado de 1,33 metros es excesivo e influye en el desplazamiento, con un valor muy por encima del deseado.

Como se ha comentado, el asistente *hull assistant* permite revisar parámetros hidrostáticos en tiempo real, así que se define una ventana donde se muestra el desplazamiento y las dimensiones iniciales del modelo. El objetivo es reducir el calado y el desplazamiento sin que afecte a otras dimensiones. Tras ajustar los valores se consigue un desplazamiento de 24.752 kilogramos con un calado de 0,9 metros.

Dimensiones	Estudio	Formas iniciales	Formas finales
Eslora casco sin plataforma $L_{H(S.Plat)}$	15,77 m	15,77 m	15,77 m
Eslora flotación L_{WL}	13,73 m	13,73 m	13,73 m
Manga máxima B_{max}	4,73 m	4,73 m	4,73 m
Puntal D	3,19 m	3,19 m	2,944 m
Calado T	1,33 m	1,33 m	0,90 m
Desplazamiento Δ	24.615 Kg	44.335 Kg	24.752 Kg

Tabla 3. Dimensiones estudio vs modelo creado en *Rhinoceros*

A continuación se procede a crear el casco de la embarcación pulsando *create hull* en el asistente. Debido a que se crea la mitad del casco, es necesario utilizar la función “simetría” dentro de la pestaña “transformar” de *Rhinoceros* para obtener la geometría completa.

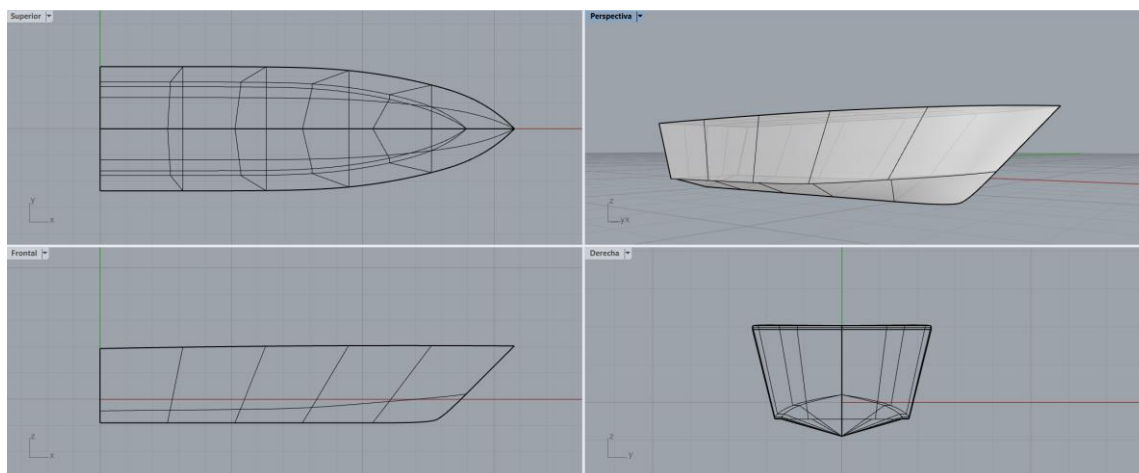


Figura 23. Vistas del casco en *Rhinoceros*

3.4 Optimización de formas

Una vez se obtiene una primera geometría usando el *hull assistant* de *Orca 3d* dentro de *Rhinoceros* se procede a analizar las formas mediante coeficientes y/o parámetros de comportamiento. El objetivo es visualizar estos parámetros con las formas actuales y modificarlas de forma que los coeficientes se ajusten con los que se recomiendan para embarcaciones planeadoras o con recomendaciones de carácter general.

Esta operación se puede realizar directamente en *Rhinoceros* con la función *preview hydrostatics* mientras cambiamos las formas en el *hull assistant* o bien modificando la geometría con los puntos de control. También se puede usar *Maxsurf* y realizar transformaciones paramétricas o por puntos de control y analizar los parámetros de forma con la herramienta *calculate hydrostatics*. En ambos casos, se deben seguir las recomendaciones que se exponen a continuación.

3.4.1 Relación Desplazamiento (Δ)– Eslora de Flotación (LWL)

La relación entre el desplazamiento y la eslora de flotación se define con la expresión siguiente: $[L_{WL}/\sqrt[3]{\Delta}]$

Para embarcaciones de alta velocidad es el factor más influyente, ya que la resistencia por formación de olas es proporcional a esta relación. El número de Fn entre 0,45 y 0,55 se deberá tener en cuenta esta relación. Por otro lado, si el número de Fn es superior a 0,8 la restantica por fricción de olas juega un papel más importante. A mayor eslora, mayor será el peso del casco y la superficie mojada en reposo. Dado que la embarcación que se proyecta en este estudio es planeadora, no se busca un valor concreto para esta relación.

3.4.2 Coeficiente prismático (CP)

El coeficiente prismático expresa la distribución longitudinal del desplazamiento. Para velocidades altas se recomiendan valores de hasta 0,7. Se puede estimar un coeficiente prismático óptimo con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}C_P &= 0,5687 + 0,1538 \times F_N - 0,0701 \times F_N^2 \\C_P &= 0,5687 + 0,1538 \times (1,11) - 0,0701 \times (1,11)^2 \\C_P &= 0,665\end{aligned}$$

Se estima que el coeficiente prismático óptimo para la embarcación a proyectar es de 0,665. Para este cálculo se ha tomado la velocidad de crucero de 25 nudos (Fn=1,11). Por tanto, se busca un Cp entre 0,665 y 0,7.

3.4.3 Coeficiente de bloque (CB)

El coeficiente de bloque es la relación entre el volumen que desplaza la embarcación y el volumen de dimensiones iguales a la eslora, la manga y el calado. Este coeficiente no se suele ser determinante para el diseño de pequeñas embarcaciones, aunque se recomienda que no sea superior a 0,5.

3.4.4 Coeficiente de la Maestra (CM)

El coeficiente de la maestra define la relación entre el área sumergida en la sección de la cuaderna maestra y el producto de la manga en la eslora de flotación y el calado. Este coeficiente influye en la resistencia al

avance. En embarcaciones rápidas se recomiendan valores pequeños, ya que mejoran al flujo ascendente desde la quilla debido a que este coeficiente tiene relación directa con la curva del casco en el pantoque.

3.4.5 Relación entre el área sumergida del espejo (AT) y el área de la cuaderna maestra (AX)

A altas velocidades de una embarcación el espejo crea una zona de depresión. En estas condiciones la embarcación tiene una eslora dinámica de la mitad de la total. Por ello, la zona de popa es la que más superficie mojada tiene. Se encarga de dar estabilidad y gobierno a la embarcación, por lo que será necesario que el espejo quede sumergido. Por otro lado, un espejo demasiado sumergido provoca una subida de consumo a velocidad de crucero. Para F_n mayores a 0,4 se estima la relación de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} A_t/A_x &= -0,0857 + 0,3967 \times F_n + 0,1061 \times F_n^2 \\ A_t/A_x &= -0,0857 + 0,3967 \times (1,11) + 0,1061 \times (1,11)^2 \\ A_t/A_x &= 0,485 \end{aligned}$$

3.4.6 Centro Longitudinal de la Carena (LCB)

La posición del centro de carena para embarcaciones que navegan altas velocidades debe encontrarse retrasada hacia popa, con el objetivo de desplazar hacia popa la curva de áreas. Para F_n mayores a 0,4 el LCB ideal, en porcentaje de eslora desde el centro de carena, se calcula con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} LCB &= -2,2189 + 12,3505 \times F_n - 5,4048 \times F_n^2 \\ LCB &= -2,2189 + 12,3505 \times (1,11) - 5,4048 \times (1,11)^2 \\ LCB &= 4,83\% \end{aligned}$$

3.5 Carena en Maxsurf

En este punto se exporta la geometría de *Rhinoceros* a *Maxsurf* para calcular los parámetros hidrostáticos y realizar las transformaciones que sean necesarias para ajustar los coeficientes de forma expuestos en el punto anterior. El objetivo de este paso es obtener una geometría válida en un formato de archivo compatible con la suite de *Maxsurf* que nos permita realizar los cálculos y análisis posteriores en este proyecto.

3.5.1 Importar carena en Maxsurf

Para importar una geometría a *Maxsurf* es necesario que corresponda únicamente a la mitad del casco. Además, hay que rotar 180° el sólido en el plano XY para que al exportar la geometría en *Maxsurf Modeler* coincidan las referencias que toma el programa por defecto. En este caso deberemos guardar un fichero de la geometría en la versión 5 de *Rhinoceros* para que *Maxsurf* (en la versión 21.14) lo reconozca al importar el archivo indicando que se trata de un fichero con extensión “.3dm” de *Rhinoceros*.

Una vez el programa importa la geometría, marcamos la opción de simetría en la ventana de propiedades de cada una de las superficies que forman el casco. A continuación, seleccionamos la opción *Half* dentro de la pestaña *Display* para visualizar el casco completo. También deberemos verificar que las unidades son metros y kilogramos. El siguiente paso consiste en fijar los puntos de referencia. Para ello se accede

a la opción *frame of reference* en la pestaña *data*. Se muestra el perfil de la embarcación. Deberemos fijar los puntos de referencia para el posterior estudio hidrostático.

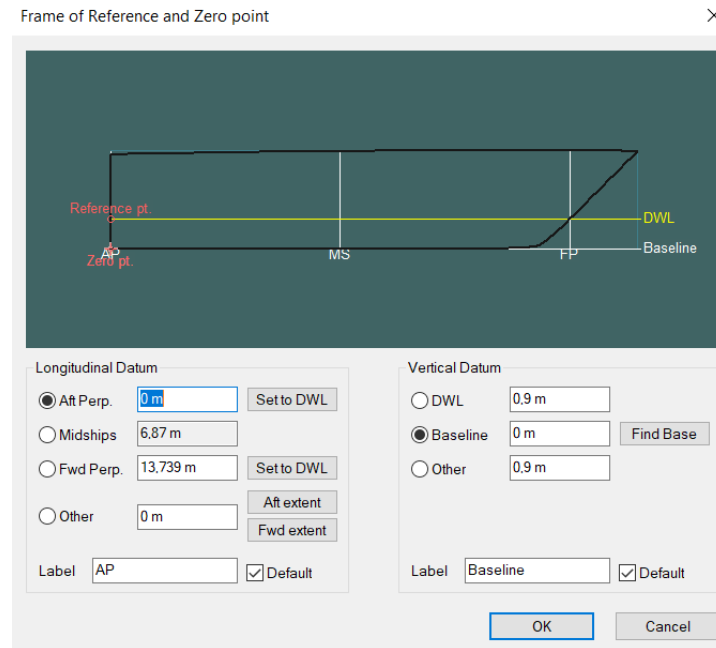


Figura 24. Puntos de referencia fijados en Maxsurf

Primeramente, fijaremos el punto base o *baseline* como referencia vertical. A continuación, se selecciona la opción *Find Base*, que encontrará el punto más bajo del perfil. En segundo lugar, seleccionamos la opción *set to DWL* para las perpendiculares de proa y popa, marcando esta última como referencia longitudinal. Este proceso se debe repetir cada vez que se realicen cambios en la geometría y se quiera realizar cualquier transformación paramétrica, análisis o cálculo posterior. En la figura 24 se muestra cuáles son las referencias que se toman para la geometría importada.

3.5.2 Cálculos hidrostáticos i transformación paramétrica

Una vez fijados los puntos de referencia se procede a calcular los parámetros hidrostáticos de la embarcación. Estos resultados pueden dar información acerca de cómo se comporta la embarcación o si las formas obtenidas se ajustan con el propósito para el cual se está diseñando el casco. En este caso en particular, se busca ajustar los parámetros anteriormente expuestos con el fin de optimizar las formas.

Al calcular los parámetros hidrostáticos del casco importado, algunos coeficientes no entran en el rango buscado para embarcaciones rápidas. En particular, se observa que el coeficiente de bloque es mayor a 0,5, que el Coeficiente prismático es cercano a 0,75 y que el coeficiente de la maestra es elevado. Se procede a realizar distintas iteraciones mediante transformación paramétrica de las formas con el objetivo de ajustar los coeficientes de forma.

Las transformaciones paramétricas se realizan mediante la opción *parametric trasnformation* en el menú *data*. Pese a que los coeficientes no sean óptimos, las variaciones sobre las dimensiones principales y las formas de la embarcación deberán mantenerse dentro de lo posible. Por esta razón, el objetivo de la transformación es de mejorar las formas, pero sin cambiarlas radicalmente. En la figura 25 se muestra la herramienta *parametric trasnformation* y también los parámetros de la última iteración realizada.

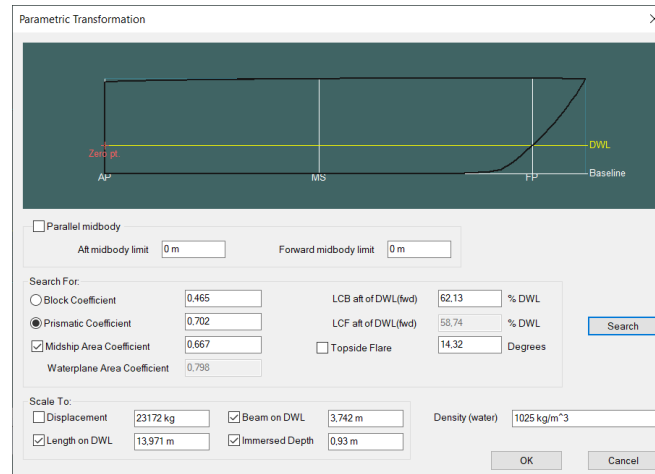


Figura 25. Transformación paramétrica en Maxsurf

Tras la transformación paramétrica se consigue reducir el coeficiente de bloque a un valor inferior a 0,5, rebajar el coeficiente prismático a un valor cercano a 0,7 y disminuir el coeficiente de la maestra. Estos cambios dan lugar a una embarcación más efectiva. Además, se ha decidido aumentar ligeramente el calado y la eslora en flotación para poder realizar los cambios anteriores en las formas sin reducir en exceso el desplazamiento. El resto de parámetros hidrostáticos finales se muestran en la figura 26.

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	23176	kg
2	Volume (displaced)	22,611	m³
3	Draft Amidships	0.930	m
4	Immersed depth	0.930	m
5	Immersed depth of station with	0.930	m
6	Immersed depth amidships	0.930	m
7	WL Length	13,971	m
8	Beam max extents on WL	3,742	m
9	Beam max on WL	3,742	m
10	Beam extents on WL of station	3,722	m
11	Beam on WL of station with ma	3,722	m
12	Beam extents on WL amidship	3,597	m
13	Beam on WL amidships	3,597	m
14	Wetted Area	54,412	m²
15	Max sect. area	2,304	m²
16	Sect. area amidships	1,992	m²
17	Waterpl. Area	41,639	m²
18	Waterpl. ltrans	40,901	m²
19	Waterpl. llong	503,359	m²
20	Prismatic coeff. (Cp)	0.702	
21	Block coeff. (Cb)	0.465	
22	Max Sect. area coeff. (Cm)	0.666	
23	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.797	
24	LCB length	5,288	from zero pt. (+ve fwd) m
25	LCF length	5,755	from zero pt. (+ve fwd) m
26	LCB %	37,851	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
27	LCF %	41,192	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
28	VCB	0.610	m
29	KB	0.610	m
30	KG fluid	0.000	m
31	BMt	1.809	m
32	BML	22,262	m
33	GMt corrected	2.419	m
34	GML	22,872	m
35	KMt	2.419	m
36	KML	22,872	m
37	Immersion (TPc)	0.427	tonne/cm
38	MTC	0.379	tonne.m
39	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1)	978,277	kg.m
40	Length:Beam ratio	3,734	
41	Beam:Draft ratio	4,023	
42	Length:Vol ^{0.333} ratio	4,941	
43	Precision	Medium	62 stations

Figura 26. Hidrostaticas en Maxsurf

Uno de los parámetros determinantes para esta clase de embarcaciones es la posición del centro de carena, que se encuentra al 37,85 % (5,2 m) de la eslora en flotación. En las recomendaciones se sugería que la posición del centro de carena estuviese a un 4,83 % (6,2 m) de la eslora en flotación desde el centro de la eslora, por lo que la posición final se encuentra aproximadamente 1 metro más retrasada. Esta posición sigue estando en un rango más que correcto para embarcaciones rápidas. En el capítulo de cálculo de pesos se revisará este parámetro, ya que es determinante para el asiento.

3.5.2 Curvas y formas

En este punto representan las formas finales obtenidas en este capítulo. Para visualizar la evolución la curva del casco se genera una rejilla con 10 secciones transversales equiespaciadas, empezando en el mamparo de popa. Estas divisiones muestran la evolución de las formas en “V” en la eslora de la embarcación. En la figura 27 se visualiza el área de dichas secciones en color verde. Hay que tener presente que estas secciones son una simple división de la geometría y no tienen relación alguna con la disposición de las cuadernas, aspecto que se determinará en el capítulo de disposición general.

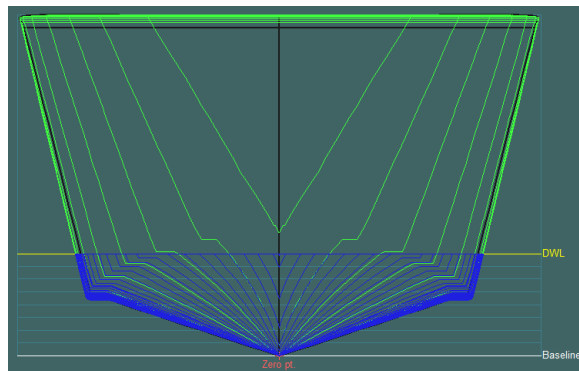


Figura 27. Secciones transversales del casco en Maxsurf

Para visualizar las líneas de agua se disponen 8 secciones longitudinales desde la quilla hasta la línea de flotación. Estas divisiones muestran las distintas líneas de agua para cada calado. Como se puede apreciar en la figura 28, a medida que disminuye el calado la interacción con el codillo se retrasa, dejando las formas más finas en proa. Esto ayudará a reducir la resistencia en situación de planeo.

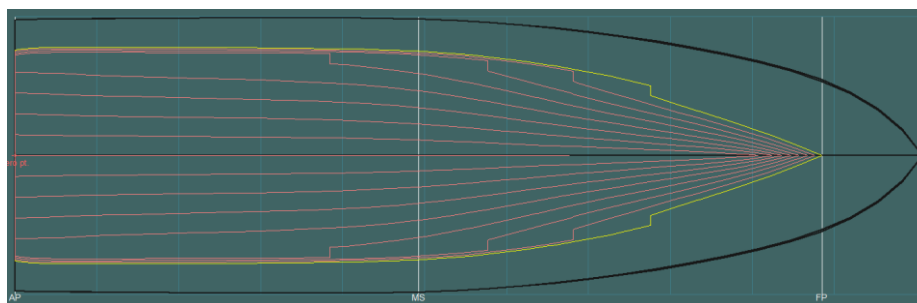


Figura 28. Líneas de agua en Maxsurf

La curva de áreas seccionales representa el área de las secciones transversales de la embarcación a lo largo de la eslora en flotación. Como se ha comentado anteriormente en este capítulo, para embarcaciones rápidas es interesante una popa de estampa. Tener un hombro de popa recto provoca una separación del flujo en el espejo, de forma que el barco aparenta tener más eslora de la que tiene

realmente respecto al flujo. De esta manera se reduce la resistencia por formación de olas, por la interacción entre los trenes de olas generados en proa y popa.

En el resto de la curva de áreas se buscan cambios suaves, de forma que no produzcan desprendimientos de la capa límite generando fricción de origen viscoso y aumentando así su resistencia al avance. Como se puede ver en la figura 29, no hay puntos de inflexión pronunciados que puedan producir picos de presión en la interacción con el fluido, aunque se recomienda mejorar la transición de las curvas añadiendo más puntos de control y analizando la geometría con funciones de análisis de curvas en *Rhinoceros*.

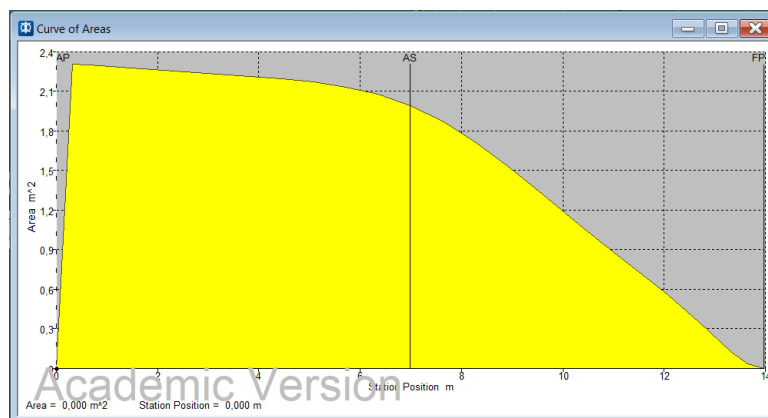


Figura 29. Curva de áreas seccionales en *Maxsurf*

3.6 Dimensiones finales

Para concluir este capítulo se recogen todos los datos obtenidos en el desarrollo de las formas conjuntamente con el resto de datos obtenidos en el estudio que van a ser necesarios en los siguientes capítulos del proyecto.

Dimensiones Finales			
Eslora total L_{max}	17,50 m	Tanque combustible Fuel _{Tank}	2.498,76 l
Eslora casco con plataforma $L_{H(Plat)}$	17,02 m	Tanque agua dulce Water _{Tank}	613,22 l
Eslora casco sin plataforma $L_{H(S.Plat)}$	15,71 m	Potencia P	1.596,23 CV
Eslora flotación L_{WL}	13,93 m	Centro de Carena LCB	37,58%
Manga máxima B_{max}	4,76 m	Posición Centro de carena	5,2 m
Puntal D	3,12 m	Área Flotación A_F	41,901 m ²
Calado T	0,93 m	Área cuaderna maestra A_x	1,992 m ²
Desplazamiento Δ	23.176 Kg	Superficie mojada	54,41 m ²
Volumen total V_T	22,61 m ³	Coeficiente de bloque C_B	0,465
Velocidad máxima V_{max}	33,55 kn	Coeficiente prismático C_P	0,702
Velocidad de crucero V_c	25,00 kn	Coeficiente de la maestra C_M	0,666
Numero de Froude a V_{max} Fn_{max}	1,47	Astilla muerta popa	18,262°
Numero de Froude a V_c Fn_c	1,1	Astilla muerta al 50% de L_{WL}	22,5°

Tabla 4. Dimensiones Iniciales

Capítulo 4. Estimación del sistema propulsivo

En este capítulo se analiza la interacción del casco con el mar desde un punto de vista hidrodinámico. Para ello se estudian las componentes de la resistencia al avance que tiene el casco a distintas velocidades y su evolución. El objetivo es estimar la resistencia de la embarcación mediante el método Savitsky y la potencia de propulsión mínima requerida, así como escoger y definir un sistema de propulsión para alcanzar la velocidad definida en las especificaciones del proyecto.

4.1 Resistencia al avance

En este punto se procede a describir la resistencia al avance de una embarcación. Para estudiar la resistencia al avance primeramente se expone la descomposición de las componentes que dan lugar a la resistencia total. A continuación, se analiza cada una de estas componentes por separado y finalmente se expresa la forma en que se pueden calcular y los factores que influyen en aumentar o reducir cada una de ellas.

4.1.1 Descomposición de la resistencia al avance

La resistencia total de una embarcación es debida a la resistencia que ofrece el agua y el aire al avance. En condiciones ideales de ensayo se supone el viento en calma. Además, la resistencia del aire es muy inferior a la que ofrece el agua, por lo que no se analiza en la primera vuelta de espiral. La descomposición de la resistencia al agua según Hughes se divide en resistencia viscosa y la resistencia por formación de olas. En la figura 30 se define como resistencia residuo toda aquella que no sea la resistencia de fricción de placa plana.

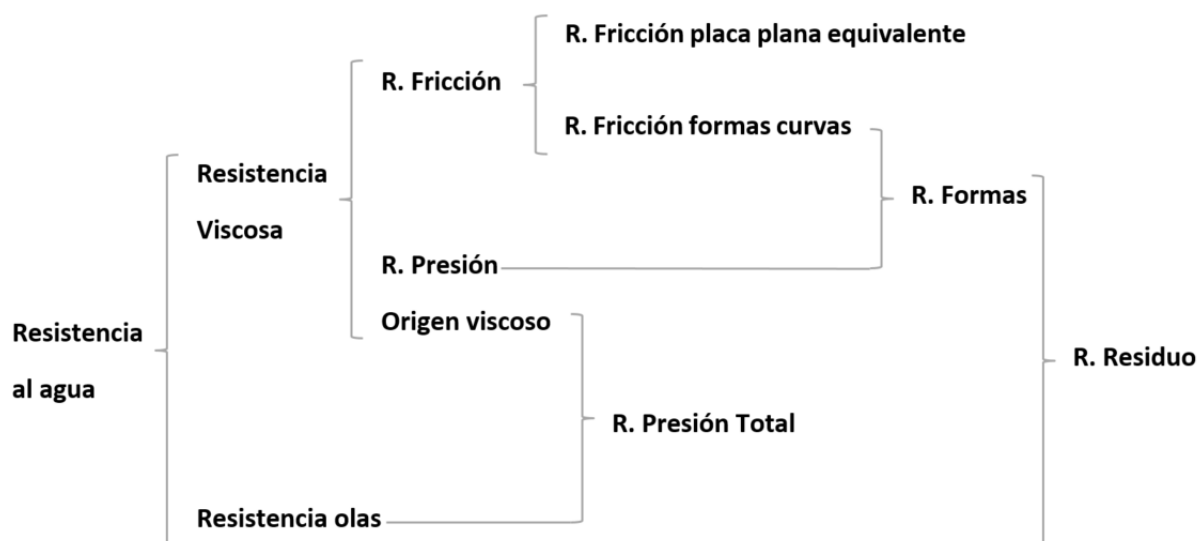


Figura 30. Descomposición resistencia al agua

Al realizar un análisis dimensional mediante el teorema de Pi-Buckingham de la resistencia al avance, se obtiene que la resistencia depende de fenómenos viscosos y gravitatorios. Los números adimensionales que representan estos fenómenos son el de Reynolds y el de Froude. El número de Reynolds está relacionado con la resistencia por fricción mientras que el número de Froude influye sobre la superficie libre y, por tanto, en la resistencia por formación de olas.

Numero de Reynolds:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Numero de Froude:

$$Rn = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Actualmente se acepta para el cálculo de la resistencia al avance la hipótesis de Hughes: $R_T = R_V + R_W$

Coefficiente Resistencia Viscosa:

$$C_V = \frac{R_V}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2}$$

$$C_V = f(Rn)$$

Coefficiente Resistencia Formación de Olas:

$$C_W = \frac{R_W}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2}$$

$$C_V = g(Fn)$$

S - Superficie mojada del casco

ρ - Densidad del fluido

V - Velocidad del barco

4.1.2 Resistencia viscosa (RV)

En la resistencia viscosa participa la resistencia de fricción de placa plana y la resistencia de fricción por curvas. De estas resistencias la más significativa es la de fricción por placa plana. Para estudiar esta resistencia se han realizado diversos estudios experimentales y teórico-experimentales, de los cuales se extraen fórmulas para calcular la resistencia por fricción en régimen laminar y turbulento.

La fórmula experimental para calcular la fricción de placa plana en régimen turbulento consiste en un arreglo de diversas líneas de corriente y se denomina ITTC-57 debido a su acuerdo en la *Internacional Towing Tanks Convention* celebrada en Madrid en el año 1957.

$$C_{Fpp} = \frac{0,075}{(\log_{10} Rn^{-2})^2}$$

En cuanto a la resistencia por fricción de superficie curva, se analiza la interacción de las curvas longitudinales y transversales del casco con el fluido. El fenómeno de separación de la capa límite del flujo por una diferencia de presiones entre proa y popa hace que se produzca una resistencia por presión de origen viscoso. Para calcular este coeficiente se define el factor de forma $(1+K)$ que define en qué medida son diferentes las curvas del casco respecto a una placa plana.

$$C_V = C_{Fpp} \cdot (1 + K) = \frac{0,075}{(\log_{10} Rn^{-2})^2} \cdot (1 + K)$$

4.1.3 Resistencia por formación de olas (RW)

La resistencia por formación de olas es la segunda componente, con matices, que más influye en la resistencia total. Esta resistencia radica en la energía que tenga el casco para generar olas. A baja

velocidad las olas generadas son de baja amplitud y, por tanto, no generan una resistencia significativa respecto al total de la embarcación. A medida que aumenta la velocidad, las olas generadas son de mayor amplitud y se incrementa la longitud de onda del patrón de olas, de forma que la componente resultante de resistencia debida a la formación de dichas olas aumenta considerablemente.

La interferencia entre los trenes de olas generados en proa y en popa puede hacer que la ola resultante se amplifique (interferencia positiva) o que se anule (interferencia negativa). Por tanto, al representar la evolución de la resistencia respecto a la velocidad, se pueden observar oscilaciones en la curva que expresan las velocidades a las cuales la interferencia entre trenes de olas genera una reducción en la resistencia por formación de olas.

Se asume que para números de Froude mayores a 0,5 la resistencia por formación de olas es la componente principal de la resistencia total. Cuando la relación entre la resistencia por fricción es inferior a la resistencia por formación de olas, suele coincidir con que el barco está en régimen de planeo. Debido al trimado dinámico la superficie mojada disminuye y se reduce así la resistencia viscosa.

En la práctica no es posible calcular la resistencia por formación de olas, por lo que se suele asumir como resistencia residual (R_R) y se puede obtener restando la resistencia viscosa tras un ensayo en un canal donde se obtiene la resistencia total. Esta calculo no es del todo exacto debido a que en la resistencia residual se incluyen otras componentes de resistencias.

4.1.4 Cálculo de la resistencia total

Para calcular la resistencia total teniendo en cuenta que no se puede calcular la resistencia por formación de olas se asume la siguiente expresión (Hughes):

$$R_T = R_V + R_W$$

$$R_T = R_V \cdot (1 + k) + R_R$$

4.2 Estimación de la resistencia y la potencia requerida

En este punto se describe el método para estimar la potencia necesaria para que la embarcación alcance la velocidad de diseño. En grandes proyectos de construcción naval se realiza un modelo a escala del casco y se estudia la resistencia en un canal de ensayos. Posteriormente se analizan los resultados y se calcula la resistencia del buque con relaciones adimensionales. Este proceso implica un alto coste, por lo que para la fase inicial de un proyecto o en el caso de embarcaciones de recreo no suele realizarse. Habitualmente se utilizan métodos de estimación de potencia basados en estudios experimentales o se usa un software informático de análisis numérico de fluidos CFD, en inglés *Computational Fluid Dynamics*.

4.2.1 Método Savitsky

En este proyecto se procede a estimar resistencia y la potencia requerida mediante el método Savitsky. Este método es el resultado obtenido en un estudio sobre la resistencia hidrodinámica de cuerpos prismáticos que realizó el Dr. Daniel Savitsky en el canal de ensayos David Taylor (EEUU) y fue publicado por la *Marine Technology Society* en 1964. Para la mayoría de diseños con alto número de Froude se utiliza este método para el estudio de la resistencia al avance, ya que los resultados en régimen de planeo y

semi-planeo son más precisos que con otros métodos de análisis basados en estudios experimentales sistemáticos.

La estimación que usa el método Savitsky se centra en embarcaciones con formas en “V” en régimen de planeo. Se estudiaron distintas placas dispuestas en forma de “V”, ya que la interacción con el agua para una embarcación con formas en V es similar. Los ensayos tienen en cuenta la evolución del trimado a medida que se incrementa la velocidad, lo que conocemos como trimado dinámico de la embarcación o *squat*.

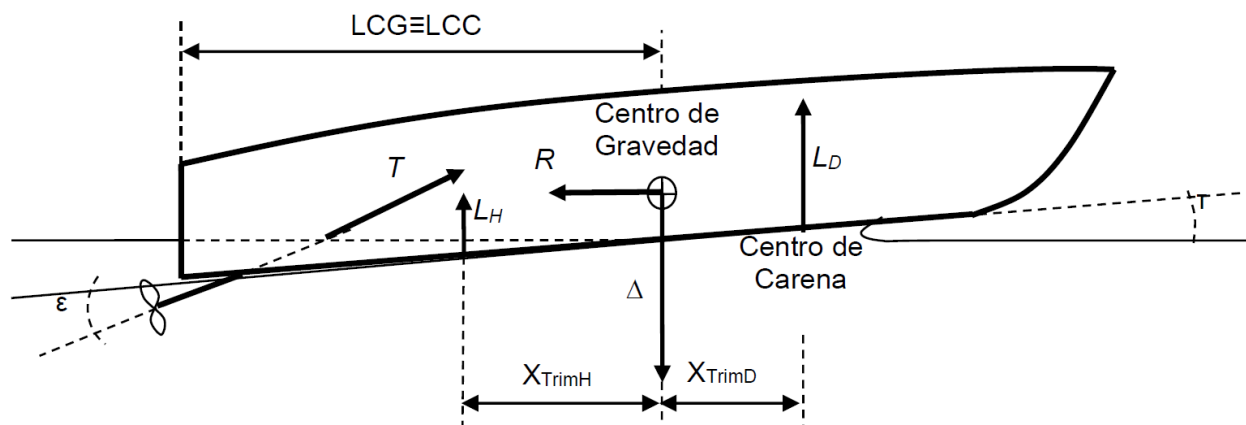


Figura 31. Equilibrio de fuerzas Savitsky - Fuente apuntes Hidrodinámica

En la figura 31 se muestra el sistema de fuerzas que actúa en el casco de una embarcación en régimen de planeo. Entre las fuerzas encontramos el empuje de la hélice “T”, que forma un ángulo “ ϵ ” con la quilla, la resistencia al avance “R”, la sustentación o *lift* “L” y el desplazamiento “ Δ ”. De todas estas fuerzas resulta un equilibrio en cada momento que define el trimado dinámico “ τ ”.

Como se ha comentado anteriormente, el estudio tiene en cuenta las formas en “V” por lo que las cotas de astilla muerta en diferentes puntos de la eslora en flotación serán determinantes para la resistencia total de la embarcación. Pese a tener en cuenta todas las fuerzas y cotas anteriores, el método Savitsky no tiene presente el codillo o *chain*, ni los *spray-rails* ni otros elementos que contribuyen a la sustentación del casco. En una segunda vuelta de la espiral de diseño se pueden analizar la interacción de estos elementos, así como el flujo de entrada y salida de las hélices mediante un programa CFD.

A diferencia de otros métodos de análisis, no hay límites en los parámetros de aplicación, aunque para bajas velocidades el análisis puede dar resultados de resistencia superiores a los que se estimarían con otros métodos. De todas formas, esto no influye en la estimación de potencia y selección del motor para una embarcación de recreo planeadora, ya que la velocidad de crucero se podrá revisar más adelante.

Para estimar la resistencia del casco obtenido en el capítulo anterior se procede a analizar la geometría mediante el método Savitsky desde *Maxsurf Resistance* y mediante una macro de *Excel*. También es posible realizar el análisis con *Rhinoceros* mediante el *plug-in Orca 3D*. De esta manera, se pretende realizar el análisis de dos formas distintas y tomar como referencia la mayor potencia calculada como la mínima requerida para el sistema propulsivo.

4.2.2 Estimación potencia requerida en Maxsurf Resistance

Para realizar el análisis de resistencia mediante *Maxsurf Resistance*, el primer paso es abrir el archivo de la geometría que se guardó previamente en *Maxsurf Modeler*. Una vez abrimos el archivo y el programa analiza la geometría, se muestran los datos necesarios para realizar los cálculos de resistencia al avance.

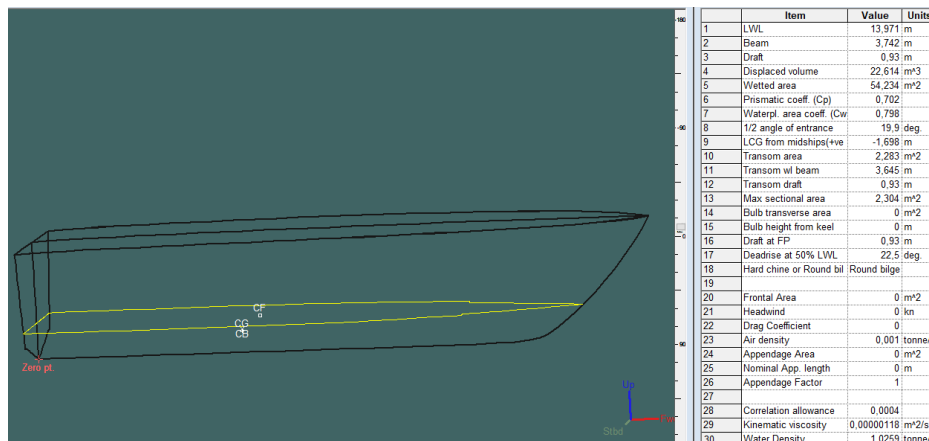


Figura 32. Datos para el análisis de resistencia al avance en Maxsurf Resistance

A continuación, seleccionamos la opción *Method* en la pestaña *Analysis*. En la ventana que aparece se muestran distintos métodos de análisis. En el apartado de métodos para embarcaciones en régimen de planeo seleccionamos la opción *Savitsky*. Una vez seleccionado el método, deberemos especificar el rango de velocidades para el análisis en la opción *Speed* y la eficiencia del propulsor en la opción *Efficiency* del desplegable *Analysis* en *Maxsurf Resistance*.

Para esta embarcación introducimos un rango de velocidades de 10 a 50 nudos. En cuanto a la eficiencia del propulsor, introducimos un valor “*Efficiency*” de 65%. con la intención de montar un sistema IPS (Volvo-Penta) que puede llegar a un 67% de eficiencia. Además, hay que seleccionar las unidades con las que se quiere trabajar este apartado. Escogemos Kilovatios para la potencia y Kilonewtons para la resistencia.

Tras introducir todos los parámetros comentados, el programa muestra dos ventanas de resultados. En la primera se muestran distintas gráficas donde aparecen la resistencia, la potencia o el trimado. Todas ellas, en función de la velocidad. En la segunda ventana se muestra una tabla con la resistencia y la potencia estimada para el rango de velocidades introducido, en este caso a intervalos de 1 nudo.

Velocidad (kn)	Potencia (KW)	Velocidad (kn)	Potencia (KW)
10,000	--	31,000	861,772
11,000	--	32,000	885,735
12,000	230,411	33,000	910,164
13,000	264,373	34,000	935,239
14,000	301,280	35,000	961,116
15,000	340,831	36,000	987,934
16,000	382,433	37,000	1.015,816

17,000	425,209	38,000	1.044,871
18,000	468,099	39,000	1.075,196
19,000	510,046	40,000	1.106,880
20,000	550,181	41,000	1.140,001
21,000	587,939	42,000	1.174,634
22,000	623,086	43,000	1.210,844
23,000	655,659	44,000	1.248,695
24,000	685,885	45,000	1.288,245
25,000	714,099	46,000	1.329,547
26,000	740,681	47,000	1.372,653
27,000	766,018	48,000	1.417,612
28,000	790,476	49,000	1.464,471
29,000	814,393	50,000	1.513,275
30,000	838,069		

Tabla 5. Estimación de Potencia en *Maxsurf Resistance*

En el estudio estadístico se estimó una velocidad máxima de 33,5 nudos y una velocidad de crucero de 25 nudos, mientras que la potencia de los motores debería ser de cerca de 1.600 caballos o 1200 kW. Como se puede ver en la tabla 5, la potencia requerida para llegar a la velocidad de 33,5 nudos se encuentra en torno a 920-925 kW. Para alcanzar la velocidad de crucero serían necesarios 714 kW. Por el momento se observa que las formas permiten alcanzar con cierta facilidad la velocidad requerida.

Como se ha cometido anteriormente, el trimado dinámico es un parámetro fundamental del comportamiento de un barco en régimen de planeo. En el gráfico 12 se muestra la evolución del trimado en función de la velocidad obtenido con el análisis e la resistencia al avance con el método Savitsky mediante *Maxsurf Resistance*. Como se puede observar, A partir de los 12 nudos el trimado aumenta desde los 5,5º hasta el trimado máximo de 7,5º a los 22 nudos. Después disminuye suavemente hasta menos de 4º. Para la velocidad de diseño de 33,5 nudos, el trimado es similar al inicial, en torno a 5º.

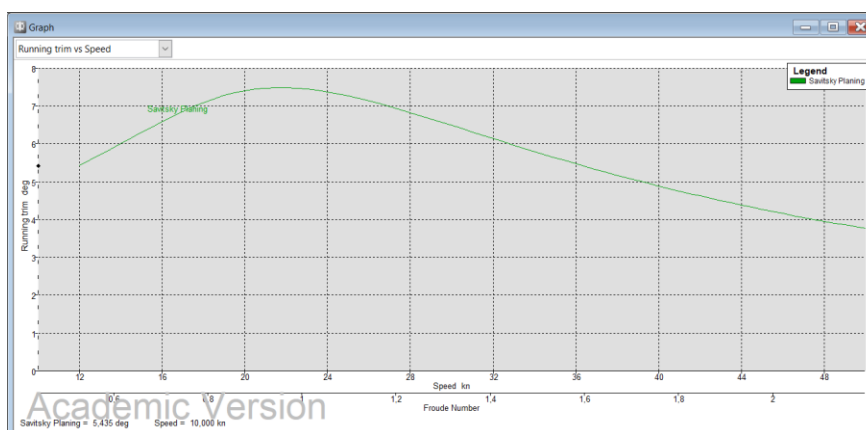


Gráfico 12. Trimado dinámico en función de la velocidad en *Maxsurf Resistance*

4.2.3 Estimación potencia requerida en Excel

Otra forma de calcular la resistencia mediante el método Savitsky es usando una hoja de cálculo² de *Microsoft Excel* diseñada específicamente para estimar la resistencia al avance con este método. Para realizar los cálculos por este método se necesitan los parámetros siguientes:

- Desplazamiento (Δ): 23,18 T
- Distancia horizontal del centro de gravedad respecto al espejo (LCG): 5,29 m
- Distancia vertical del centro de gravedad (VCG): 0,54 m
- Distancia entre la línea de ejes y el centro de gravedad (f): 0,88
- Manga entre el extremo de los codillos (B): 3,74 m
- Ángulo de astilla muerta en popa (β_r): 18,26°
- Ángulo de astilla muerta en la mitad de la eslora de flotación (β_0): 22,5°
- Distancia entre el espejo y la cuaderna maestra (L_0): 5,76 m
- Ángulo entre la quilla y la línea de ejes (ϵ): 0,0°

Los resultados de la potencia requerida se muestran en la tabla 6. La potencia que calcula la hoja de cálculo corresponde a la potencia de remolque, por lo que se ha ajustado suponiendo un 65% de eficiencia para poder comparar las potencias estimadas en *Maxsurf Resistance*. La potencia requerida para alcanzar la velocidad de diseño, de 33,5 nudos es de 926 kW. Para navegar a 25 nudos se requieren 750 kW.

Velocidad (kn)	Trimado (°)	Potencia (kW)
9,0	4,87	101,195
13,0	5,99	329,996
17,0	7,11	524,896
21,0	7,36	660,579
25,0	6,86	749,598
29,0	6,11	826,569
33,0	5,37	911,307
37,0	4,72	1012,965
41,0	4,17	1136,357
45,0	3,70	1284,658
49,0	3,31	1460,418
53,0	2,98	1665,736
57,0	2,70	1902,517
61,0	2,46	2172,795

Tabla 6. Estimación de Potencia en Excel

² La Hoja de cálculo usada ha sido programada por el doctor Julio García Espinosa.

La evolución del trimado dinámico se representa en el gráfico 13. Igual que en la estimación del trimado dinámico con *Maxsurf*, el trimado aumenta hasta los 20 nudos, llegando a 7,4°. Posteriormente se va reduciendo hasta valores inferiores a los 3°. A velocidad máxima, el trimado se estima que oscilará alrededor de los 5°. Estos valores son razonables, un casco trimado excesivo puede comportar inestabilidad y pérdida de gobierno en el comportamiento de la embarcación.

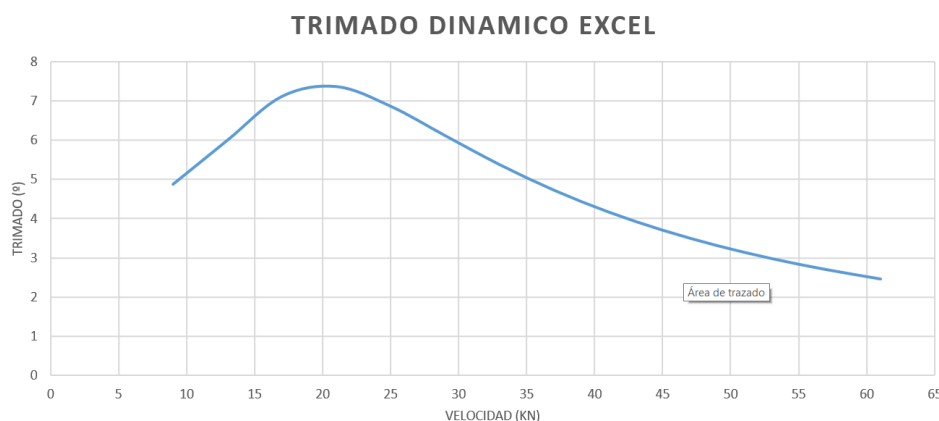


Gráfico 13. Trimado dinámico en función de la velocidad Excel

4.2.4 Análisis de resultados

En este punto se procede a analizar las gráficas de resistencia y de potencia estimadas con los métodos anteriores. El objetivo es visualizar la evolución de la resistencia y la potencia requerida para definir la velocidad máxima y la velocidad de crucero.

Primeramente, se analiza la resistencia de la embarcación en kilonewtons respecto a la velocidad a la que navega. Debido a que la embarcación proyectada es de planeo, se espera que la resistencia total al avance aumente a bajas velocidades, generando un máximo tras el que el casco se sube a la ola que genera y el trimado se reduce disminuyendo así la superficie mojada.

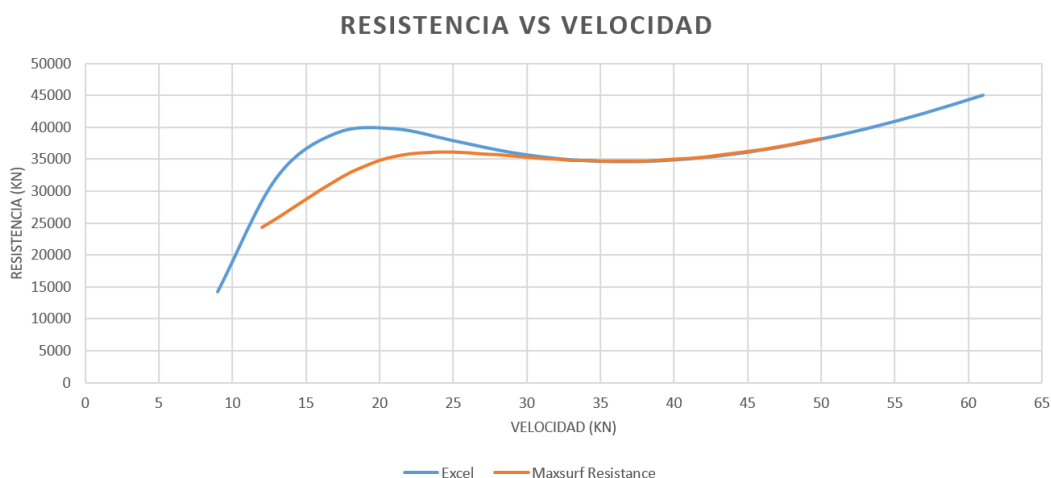


Gráfico 14. Resistencia al avance en función de la velocidad

Como se aprecia en el gráfico 14, la resistencia al avance a altas velocidades es prácticamente la misma para el cálculo en Excel como la estimación de *Maxsurf Modeller*. Sin embargo, la resistencia para

velocidades inferiores a 25 nudos es claramente mayor en el cálculo en *Excel*. Esto se debe a que el cálculo tiene en cuenta la fase de semi-planeo. Como principal característica de esta grafica podemos apreciar un valle o mínimo en la resistencia en fase de planeo que se sitúa en torno a los 35 nudos de velocidad. Por tanto, la velocidad máxima del casco si montamos una potencia suficiente podría ser de más de 35 nudos. La resistencia a 33,5 nudos es de **35,95 kN**.

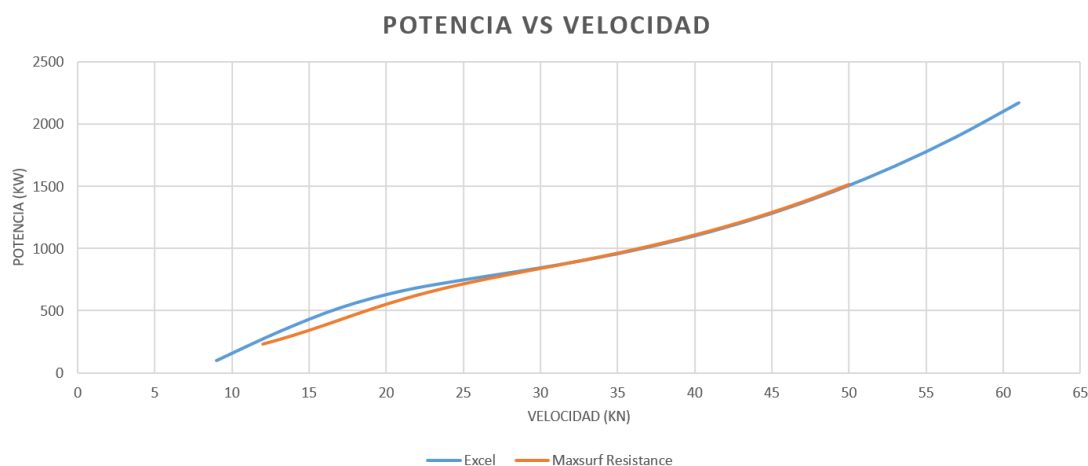


Gráfico 15. Resistencia al avance en función de la velocidad

En cuanto a la curva de potencia requerida, ocurre una situación similar que con la resistencia. A bajas velocidades hay cierta diferencia en la estimación de potencia, mientras que en régimen de planeo los valores son muy similares. Si nos fijamos en la evolución en el gráfico 15, la potencia requerida aumenta de forma más pronunciada hasta la fase de planeo. De 25 a 30 nudos la potencia requerida crece de forma contenida, posteriormente la potencia necesaria aumente exponencialmente. En definitiva, velocidades de 25 a 35 nudos tienen un buen compromiso entre potencia requerida y velocidad.

Para estimar la potencia se usarán los valores obtenidos mediante la hoja de cálculo de *Excel*. Dado que son siempre superiores, por lo que suponen una estimación más crítica. De acuerdo a esos cálculos, la potencia necesaria para alcanzar los 33,5 nudos sería de **926,46 kW**.

Por último, el trimado máximo que alcanza el casco es de **7,36°**. A máxima velocidad el trimado es de **5,37°**. Para suavizar la curva de trimado dinámico, sería recomendable incorporar un sistema de *flaps* en el espejo de popa. La incorporación de esta clase de apéndices se deja para la siguiente fase de la espiral, en la que las formas del casco y la posición del centro de gravedad sea la definitiva.

4.3 Elección del sistema propulsivo

En este punto se procede a la selección del sistema de propulsión que se ajuste al cálculo de la potencia requerida y se adapte al tipo de embarcación que se proyecta, a la vez que sea compatible con una navegación de planeo.

4.3.1 Potencia i rendimiento y eficiencia

En el punto anterior se ha obtenido la potencia requerida para navegar a la velocidad de diseño. Esta potencia corresponde a la potencia mínima requerida. Como se ha comentado, en la estimación de

potencia ya se ha considerado que la eficiencia de propulsión era de un 65%. De entrada, supondremos que vamos a montar 2 motores, por lo que la potencia requerida se repartirá a partes iguales. Se recomienda que la potencia instalada supere en un 15 % la potencia calculada para garantizar que se alcance la velocidad de diseño. Este factor se conoce como margen de mar. Además, es habitual dar un margen del 10% adicional para que el motor no trabaje forzado y no genere altos costes de mantenimiento.

Los factores comentados se suelen usar en embarcaciones mercantes, en las que la velocidad puede ser un factor clave del proyecto y, de no alcanzarse, puede suponer un coste muy alto por incumplimiento de contrato en caso de no alcanzarse. Para la embarcación planeadora que se proyecta, se supone también un margen de mar de 15 % ya que si las condiciones del mar no son favorables será complicado alcanzar el régimen de planeo e incluso mantenerlo.

Como consideración final, hay que tener presente que la potencia calculada corresponde a la potencia de remolque, mientras que la potencia que aporta el fabricante suele corresponder a la potencia en el cigüeñal del motor, así pues, hay que tener en cuenta las pérdidas mecánicas y obtener la potencia en el eje de la hélice. En este caso ya se ha supuesto un rendimiento propulsivo donde se incluyen las pérdidas mecánicas anteriormente.

La potencia final suponiendo un 15% de margen de mar se calcula de la siguiente manera:

$$P_{Motor} = \frac{P_{Remolque}}{N_{motores}} \times 1,10 = \frac{926,46}{2} \times 1,15 = 532,71 \text{ kW}$$

4.3.2 Sistema de Propulsión

Para el sistema de propulsión de la embarcación se busca un conjunto de 2 motores dentro-fueraborda que sean eficientes y también compactos, para no comprometer la habitabilidad. De las embarcaciones del estudio estadístico es habitual el uso de una configuración de dos motores IPS Volvo-Penta. Estos motores tienen muchas ventajas en comparación con motores intra-borda tradicionales. Entre las cuales:

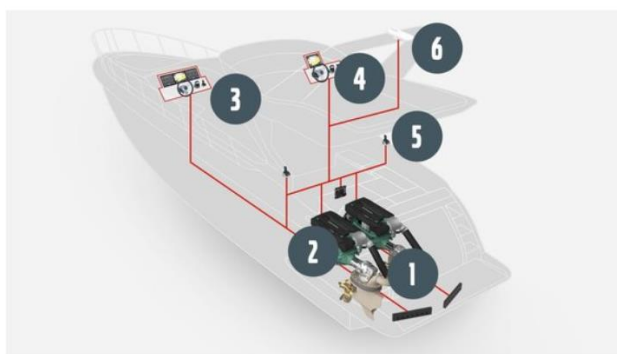
- 40% más de autonomía de crucero.
- 20% más de velocidad punta.
- 30% menos de consumo.
- 30% menos de emisiones de CO₂.
- 50% menos de ruido.
- Mayor espacio de acomodación.

Como se puede ver en la figura 33, es evidente lo compacto que resulta el conjunto. El sistema IPS está compuesto por un motor, una unidad de transmisión, un sistema de escape y la cola. Además, las hélices contra-rotativas se han diseñado para trabajar en conjunto con el motor y tienen la particularidad de que se encuentran hacia proa. Por ello en aguas tranquilas el flujo que le llega a la hélice es muy limpio y el empuje es paralelo a la velocidad siendo, así, mucho más eficaz.



Figura 33. Motor IPS800/950 – Fuente: Página web de Volvo-Penta

Estos motores están pensados para configuraciones de 1 a 4 unidades. Pueden controlarse con el sistema de control (EVC), que permite añadir un sistema de posicionamiento dinámico de tipo interceptor. En la figura 34 se pueden observar las posibilidades que ofrece el sistema de control. Es un punto importante en una embarcación de este tipo, ya que el armador suele valorar la facilidad de uso, sobre todo en el caso de no disponer de tripulación.



El control electrónico de la embarcación o EVC (Electronic Vessel Control) supervisa y conecta todos los sistemas electrónicos a bordo:

1. Unidades propulsoras dirigibles individualmente con hélices dobles contrarrotantes
2. Motores modernos y eficaces conectados a las unidades propulsoras
3. Puesto de pilotaje con acelerador, pantallas, joystick, rueda de timón
4. Conectividad adicional con el puesto de pilotaje principal
5. Joystick para atraque
6. Otras opciones EVC disponibles, como el sistema de posicionamiento dinámico

Figura 34. Electronic Vessel Control – Fuente: Página web de Volvo-Penta

4.3.3 Hélice y huelgos

Como se ha comentado, la hélice viene montada en conjunto con un sistema azimutal o *pod* que contribuye a una buena maniobrabilidad. Para motores D11 de la gama IPS se incluye una hélice contra rotante tipo P/PS de aleación de nibral (níquel, bronce y aluminio). La hélice delantera es de tres palas y la trasera de cuatro. Estas hélices están diseñadas para trabajar conjuntamente y son ideales para embarcaciones planeadoras que naveguen entre 20 y 40 nudos. Además, la posición de las hélices permite que no se produzca cavitación, incluso en giros cerrados o en el momento de máxima aceleración.

4.3.4 Unidad seleccionada

De los motores con la tecnología descrita se busca un modelo con más de 532 kW. Además, interesa que sea lo más pequeño posible. Encontramos el modelo D11 *common-rail*, que es un motor de 10,8 Litros de cilindrada y 6 cilindros en línea. Cuenta con un sistema de sobrealimentación que incorpora un turbo y un compresor, un sistema que Volvo denomina *twin entry*, que incorporan los motores más eficientes de la marca.

El motor D11 se encuentra en dos variantes de potencia. El modelo IPS800, de 435 kW (625 CV), y el modelo IPS950, de 533 kW (725 CV). En el caso de la embarcación proyectada se escoge el **IPS950**, de **533**

kW. De todas formas, la opción de tener dos niveles de potencia puede ser interesante, ya que la embarcación puede ofrecerse al cliente con dos variantes, con distinta velocidad máxima, y la menos potente a un precio inferior, con el mismo diseño del casco, la misma estructura y los mismos sistemas

Con una potencia instalada de 1066kW, equivalente a 1450CV, la embarcación alcanzará la velocidad de diseño, de 33,5 nudos, y es posible que pueda llegar a una velocidad máxima de más de 35 nudos a máxima potencia. Se calcula la autonomía a 2250 rpm en cada motor, que son las revoluciones recomendadas para alta velocidad. A estas revoluciones cada motor tiene un consumo de 105 litros a la hora, para alcanzar una autonomía de 350 millas nauticas, la embarcación deberá disponer de tanques de combustible con una capacidad de 2.200 litros.

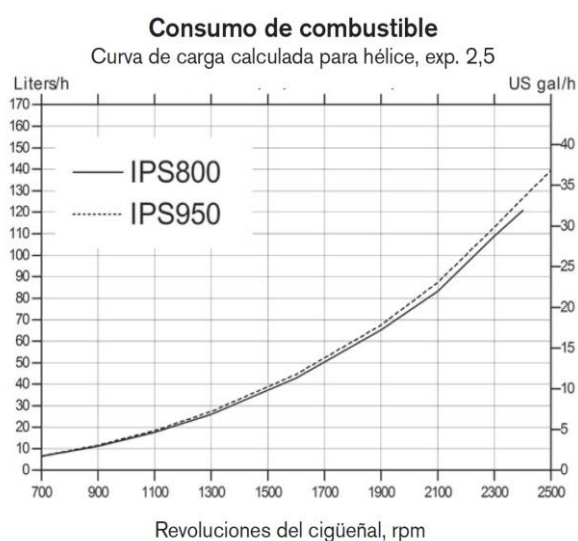


Gráfico 16. Electronic Vessel Control – Fuente: Brochure IPS950 de la web de Volvo-Penta

En el gráfico 16 se muestra la curva de consumos para un motor como el que se instala en la embarcación. Mediante los consumos podemos estimar la autonomía o calcular qué capacidad de combustible es necesaria para una autonomía objetivo. Con una capacidad de combustible de 2200L calculada anteriormente, se espera que la autonomía a velocidad económica sea de más de 500 millas. En la tabla siguiente se muestran los resultados del dimensionamiento del sistema propulsivo para la embarcación y se comparan con los obtenidos anteriormente en el estudio estadístico.

Especificaciones	Estudio	Instalada
Potencia	1.596,23 CV	1.450 CV
Velocidad de Crucero	25 kn	25 kn
Velocidad Máxima	33,5 kn	> 33,5 kn
Tanque de combustible	2.498,76 l	2.200 l
Autonomía mínima	350 mn	350 mn
Autonomía a 25	-	>500 mn

Tabla 7. Especificaciones sistema de propulsión

Capítulo 5. Disposición General

En este apartado del proyecto se procede a definir la posición de los motores, así como la forma y la disposición de los elementos transversales y longitudinales. Una vez se dispone de la distribución de los elementos principales, se delimitan los espacios de maquinaria, de los tanques de consumo y de los alojamientos. Dado que la embarcación que se proyecta tiene un fin recreativo, el objetivo de este capítulo es maximizar todo lo posible la habitabilidad interior.

5.1 Disposición de elementos transversales y longitudinales

Para disponer los refuerzos longitudinales y transversales hay que determinar primeramente la posición de los motores y de sus soportes. Como se ha comentado en el anterior capítulo, el motor seleccionado es el Volvo-Penta IPS 950, por lo que hay que tener en cuenta las especificaciones técnicas del modelo y, en la medida de lo posible, seguir al máximo las recomendaciones del fabricante para una correcta instalación, para intentar evitar cualquier tipo de problema futuro por ese motivo.

En el momento de la búsqueda el fabricante no aporta toda la información necesaria en su página web, por lo que se precede a usar las especificaciones del predecesor IPS900, dado que se trata del mismo motor D11 y sus especificaciones son prácticamente las mismas. Esta información se encuentra en una página web de un distribuidor holandés de motores marinos.

5.1.1 Posición de la cola y el motor

A partir de la información recopilada, primeramente se trabaja con la disposición longitudinal de los motores. Las especificaciones del fabricante recomiendan que desde el centro de la cola azimutal hasta el fin de la quilla en el espejo de popa debe haber una distancia mínima de 850 mm. En el interior del casco debe haber un mínimo de 50 mm entre el espejo de popa y el tubo de escape, que es el elemento más cercano al espejo.

En segundo lugar, se requiere que la distancia transversal del centro del motor hasta la línea de crujía debe estar entre 600 mm y 950 mm. Además se especifica que la distancia vertical mínima para realizar el mantenimiento de la cola debe ser de 350 mm en la zona más cercana al espejo de popa.

Por último, se recomienda que la distancia entre motores, de centro a centro, sea de 1400 mm. Para lograr esta medida con un ángulo de astilla muerta (β) de 18.262° se recomienda que la distancia entre crujía y el centro del motor (**A**) sea de **871 mm**.

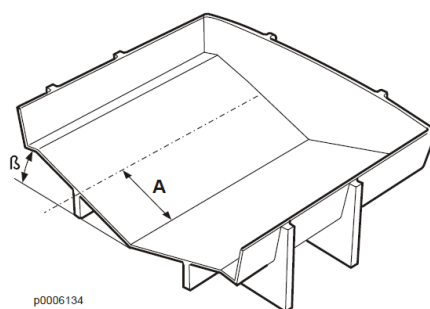


Figura 35. Distancia centro del Motor a crujía – Fuente: *Installation, Volvo Penta IPS*

A partir de las bases descritas anteriormente, se procede a disponer los motores principales. Para montar los motores sobre el fondo de la embarcación hay que diseñar un refuerzo estructural que permita sostener los motores y soportar los momentos que se produzcan durante la utilización de los mismos. Siguiendo las especificaciones del fabricante, y tomando el plano del propulsor IPS900, se disponen como se muestra en la figura 36. Los soportes para el motor se muestran en color Rojo, la distancia entre los motores es de 1400mm y la altura total del conjunto es de 1,47 metros.

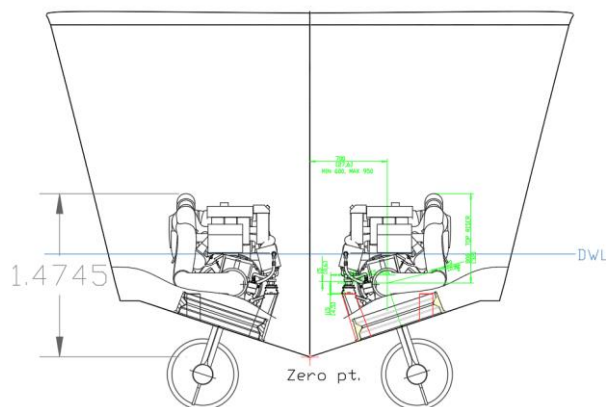


Figura 36. Disposición de los motores en perfil

Como se ha comentado en el capítulo anterior, los motores IPS van unidos a una cola azimuthal que atraviesa el casco. Esto implica diseñar los soportes de los motores conjuntamente con la instalación de la cola. El fabricante aporta especificaciones de diseño de los refuerzos para distintas configuraciones de motor en función del material.

Para este proyecto, debido a que el material del casco se va a diseñar con materiales compuestos, hay que seguir las recomendaciones del fabricante para refuerzos con esta clase de materiales en una configuración de dos propulsores. Se colocan los soportes del motor y refuerzos recomendados para el conjunto y la disposición en planta del propulsor y sus apoyos queda como se muestra en la figura 37.

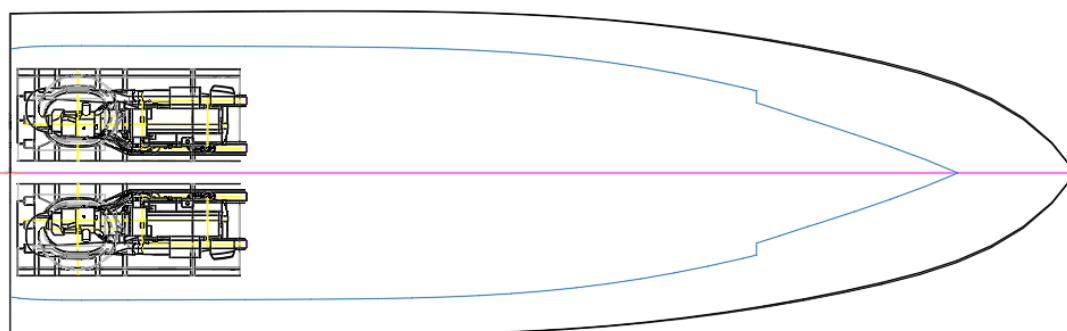


Figura 37. Disposición en planta del propulsor y sus apoyos

5.1.2 Disposición de los mamparos transversales

Los mamparos trasversales son elementos estructurales repartidos a lo largo de la eslora del casco con el objetivo de reforzar la estructura del mismo. Son también los apoyos donde recaen las cuadernas, por lo que su posición determina la separación de espacios. En este barco se decide hacer coincidir los refuerzos

transversales requeridos para el sistema propulsor, mostrados en la figura 38, y mantener la disposición en toda la eslora.

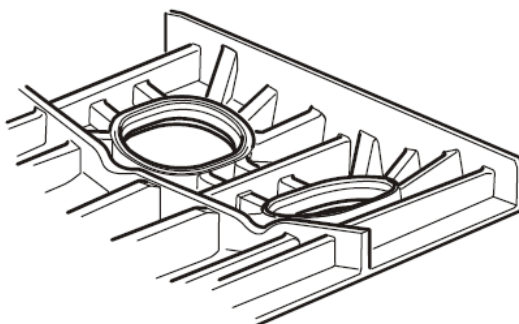


Figura 38. Distribución de refuerzos recomendada. Fuente: *Installation, Volvo Penta IPS*

Para realizar la operación comentada se usa el plano de los soportes en aluminio como base. A partir de ahí, se modifica para adaptar los refuerzos las especificaciones para materiales compuestos. Dado que no se conoce el espesor del casco se realizan planos 2D para una distribución inicial sin tener en cuenta el espesor, de forma que los refuerzos lleguen hasta el extremo del casco. En una segunda vuelta de espiral, con más datos acerca del espesor real de la embarcación, se propone adaptar la distribución en 3D con las dimensiones exactas.

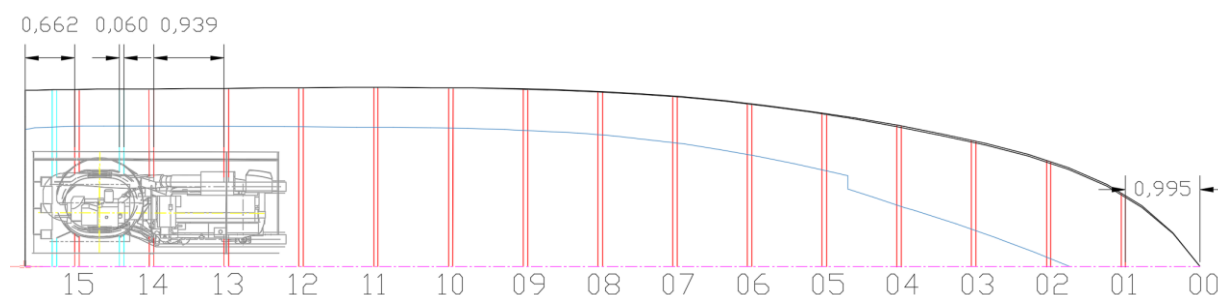


Figura 39. Disposición en planta de los mamparos transversales

Como se puede observar en color rojo en la figura 39, se han dispuesto 15 refuerzos transversales de 60 mm de espesor con una separación de 0,94 metros, a excepción de los refuerzos transversales situados en los extremos del casco. En proa, el primer refuerzo se encuentra prácticamente a un metro de la eslora máxima, mientras que en popa el primer refuerzo está a 0,66 m del espejo.

En color cian se representan los refuerzos transversales que dan soporte al alojamiento de la cola. Estos refuerzos secundarios, como se muestra en la figura 39, se extienden sólo hasta el último refuerzo longitudinal. Con estas divisiones, se extrae que la clara de cuaderna es de 0,94 m, o 1 m de centro a centro del refuerzo, por lo que se deberán disponer los alojamientos y compartimentos de forma que las cuadernas que delimiten los espacios se apoyen en estos refuerzos.

5.1.3 Disposición refuerzos longitudinales

De igual forma que en el punto anterior, se sigue la distribución propuesta para el soporte del motor. En consecuencia, se dispondrán dos refuerzos longitudinales que continúan tras los soportes del motor hacia proa. Además, se incluye otro refuerzo longitudinal paralelo a los que se usan como soporte motor,

también apoyado sobre el fondo de la embarcación. La dimensión de estos refuerzos se analizará de forma más detallada para el cálculo estructural. En este capítulo se muestra solamente una disposición orientativa.

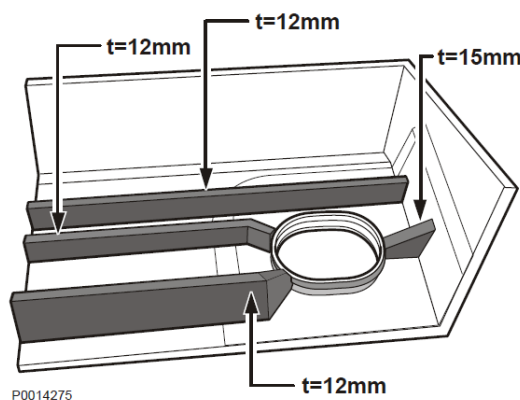


Figura 40. Distribución de refuerzos longitudinales Fuente: *Installation, Volvo Penta IPS*

Los refuerzos longitudinales son el apoyo principal de las cubiertas, por lo que además de los refuerzos dispuestos en el fondo de la embarcación se incluyen dos refuerzos longitudinales sobre los costados. Sobre uno de ellos se apoyará la cubierta exterior, mientras el segundo quedará a mitad de la altura de la cubierta inferior. Esta cubierta inferior se apoya sobre los refuerzos longitudinales dispuestos en el fondo, por lo que se estima que no harán falta más refuerzos en el costado, aunque podrían añadirse si fuera necesario.

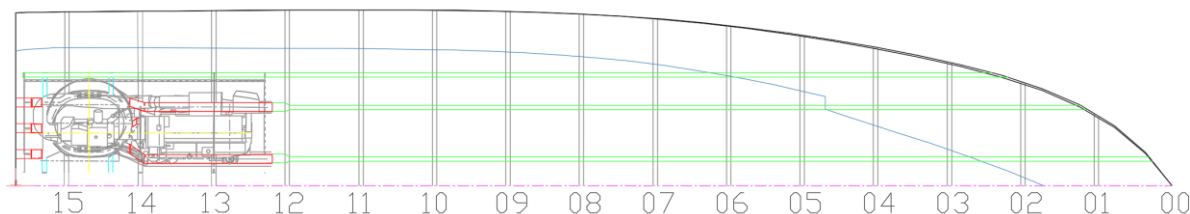


Figura 41. Disposición indicativa mamparos longitudinales

En la figura 41 se muestra una orientación sobre la posición de los refuerzos longitudinales respecto a la crujía. En 2D es complejo representar la vista de un objeto que es normal a una superficie curva, por lo que de forma indicativa tenemos tres perfiles longitudinales de 60 mm de espesor. En rojo se muestra la parte de los refuerzos que sirven de apoyo para el motor y para la cola. El espesor y la altura de los perfiles se reduce tras la cuaderna número 12.

5.2 Distribución de Espacios

Una vez determinada la posición de los refuerzos longitudinales y transversales de la embarcación, se procede a realizar la distribución de los distintos espacios que debe albergar el barco a proyectar. Primeramente, se realizará la disposición de cámara de máquinas. A continuación, se dispondrán las distintas cubiertas y mamparos estancos, para finalmente diseñar la acomodación. Es importante tener en cuenta que la embarcación proyectada es de recreo, por lo que se debe priorizar la habitabilidad.

La embarcación debe disponer de camarotes para albergar a seis pasajeros, dos baños, una cocina completa, una zona de comedor y un área de relajación y solárium. Además, se decide habilitar un espacio para una embarcación secundaria o para motos de agua.

5.2.1 Cámara de máquinas

Para optimizar la habitabilidad, en esta embarcación se intenta reducir a la mínima expresión la sala de máquinas. En el apartado anterior se han posicionado los motores lo más a popa posible y ahora se propone dejar una clara de cuaderna adicional a la posición más a proa de los motores. En este espacio se dispondrán los tanques de combustible y de agua dulce sanitaria.

Para una mejor distribución de la habitabilidad se decide que el acceso a la cámara de máquinas sea a través de una escalera vertical y de una escotilla alojada en la cubierta exterior. Además, de esta forma las vías de agua en este espacio se limitan a la escotilla y a los conductos de ventilación del compartimento.

Los tanques de combustible deben tener una capacidad de 2.200 litros, como se ha estimado en el capítulo anterior. Se disponen dos tanques de combustible simétricos en los extremos de la cámara de máquinas. Se estima necesaria una capacidad de 600 litros a razón de 15 litros por persona y día contando con una travesía de 7 días con 6 personas a bordo. Se dispone un depósito entre los tanques de combustible comentados.

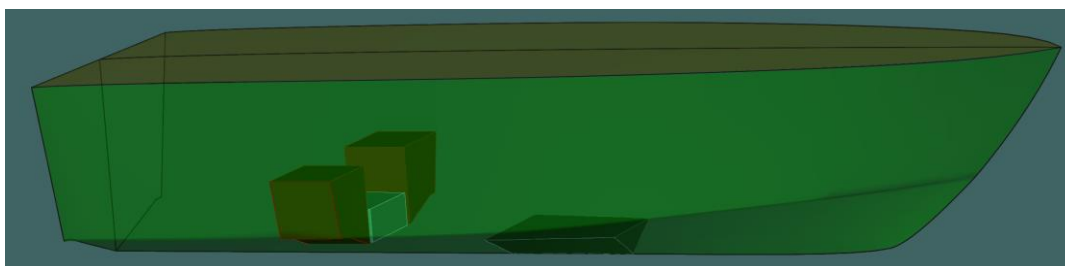


Figura 42. Disposición de tanques en *Maxsurf Stability*.

El tanque de aguas negras no se ha contemplado anteriormente. Como se puede apreciar en la figura 42, se dispone de un tanque sobre el fondo, debajo de las cubiertas de habilitación. En una siguiente iteración del proyecto se calcularán los sistemas de la embarcación, por lo que deberá estudiarse la incorporación del tanque de sentina y valorar si se incorpora también tanque para la retención de aguas grises.

En la tabla 8 se muestra la capacidad total de los tanques y de los depósitos. En todos los casos la capacidad a instalar es superior a la requerida. En el caso del tanque de aguas negras, la capacidad es mayor a la que se suele instalar en embarcaciones de este tipo. Como se ha comentado, se propone revisar este tanque al calcular los sistemas y valorar la posibilidad de dividirlo y usar la mitad para retener o reciclar aguas grises.

Especificaciones	Estimada	Dispuesta
Tanque de Combustible	2.200 l	2.240 l
Depósito de Agua Sanitaria	600 l	643 l
Tanque de Aguas Negras/Grises	-	653 l

Tabla 8. Capacidad tanques

5.2.2 Pique de Proa

En este proyecto no se realizarán estudios de inundación de la embarcación, por lo que no se conocen las necesidades de compartimentos estancos necesarios para mantener a flote la embarcación en caso de vía de agua. Sin embargo, se dispone un pequeño pique de proa desde la roda hasta la primera cuaderna, lo que aporta un compartimento de aproximadamente un metro de longitud.

5.2.3 Disposición de cubiertas plataforma y techo

Los elementos longitudinales que delimitan los espacios de esta embarcación y que se disponen en este punto son tres: las cubiertas de los distintos espacios bajo la cubierta superior, la plataforma de baño tras el espejo de popa y el techo o superestructura que cubre parte de la cubierta exterior.

Debido a las pronunciadas formas en “V” que tiene el casco de la embarcación, se ha dividido la cubierta inferior en cuatro secciones a distintas alturas. En cámara de máquinas se dispone una cubierta a 0,29 m de la línea base. A continuación, la primera cubierta dedicada a la acomodación se sitúa a 0,68 m y abarca tres cubiertas. Tras un escalón de 0,26 m se encuentra la segunda cubierta de habilitación, justo en la línea de flotación de 0,94 m que también ocupa tres claros de cuaderna. En último lugar, se dispone una cubierta a 1,20 m donde habrá sólo un camarote, ya que las formas curvas del costado reducen considerablemente el espacio útil.

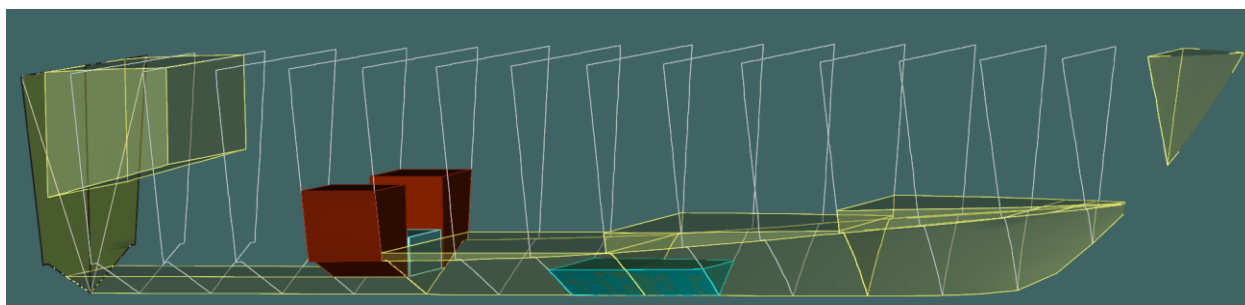


Figura 43. Cubiertas Inferiores en *Maxsurf Stability*

Para la plataforma de esta embarcación se ha decidido disponer una fija por encima de la línea de flotación. En las dimensiones preliminares se estimó una eslora de 17,02 m del casco con una plataforma de 1,25 m. En el diseño se ha incorporado una de 1,37 m que resulta en una eslora del casco con plataforma ($L_{H(Plat)}$) de 17,093 m.



Figura 44. Plataforma de baño en *Rhinoceros*

5.3 Acomodación

Una vez definidos los principales elementos estructurales y las divisiones del espacio, se realiza una primera disposición del espacio dedicado a la acomodación de los pasajeros. En este punto es importante buscar la simetría en la disposición de espacios y ubicar los mamparos transversales sobre las cuadernas. La posición de los elementos que se disponen en este punto será crucial para la estimación del peso total de la embarcación y del cálculo del centro de gravedad.

Para la distribución de la acomodación se disponen puertas de 0,5 metros de ancho y alguna puerta corredera. Además, se pretende dejar un espacio de entre 0,5 y 0,6 metros entre los elementos de mobiliario, para que las estancias sean mínimamente ergonómicas.

5.3.1 Cubierta Inferior

Para realizar la disposición de las cubiertas inferiores se exporta la planta de las cubiertas obtenidas en *Maxsurf Stability*. Debido a que están a distinta altura, se ha realizado una distribución dividida en tres espacios principales, sin la cámara de máquinas que ya se ha comentado en el punto anterior.

En la cubierta que encontramos contigua a la cámara de máquinas se encuentra el camarote más amplio del yate. Este camarote cuenta con una habitación doble y un baño con dos lavabos y una ducha al que se accede por una puerta corredera. La estancia cuenta con una altura libre de hasta 2,4 metros y unas formas muy regulares que permiten instalar muebles de dimensiones estándar.

Tras el primer mamparo transversal de la acomodación se encuentra la segunda cubierta donde la altura libre es de hasta 2,18 metros. Ésta cubierta alberga una cocina completa, un aseo y un pequeño camarote con una litera. Además, la cocina diáfana hace a su vez de distribuidor de las estancias y allí se encuentra la escalera por la que se accede a la cubierta superior. En la cocina se han dispuesto zonas con medidas estándar que permitan instalar fácilmente electrodomésticos.

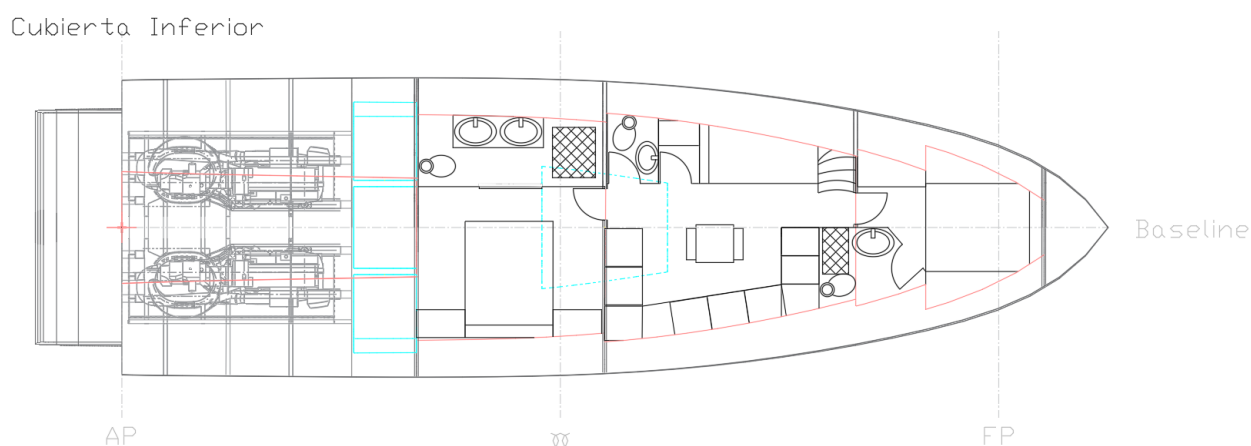


Figura 45. Acomodación cubierta inferior en AutoCAD

El último espacio de acomodación se encuentra en la proa. Por las formas del casco esta zona presenta alguna dificultad para implementar una zona de acomodación. La solución que se propone consiste en distribuir el espacio a distintas alturas. La cama se encuentra elevada 0,5 metros para colocarse lo más a proa posible. Suponiendo una altura de la cama de 0,35 metros la altura libre entre el colchón y el techo será de un metro. De todas formas, la altura en el camarote antes de la cama es de hasta 1,93 metros,

por lo que el resultado es satisfactorio. Como suele hacerse en estas estancias, se disponen muebles a medida en los laterales de la cama, para tratar de aprovechar todo el espacio disponible. Además, se dispone un pequeño baño con ducha.

En definitiva, la cubierta inferior cuenta con la mayor parte de la habitabilidad requerida. De esta forma la mayor parte del mobiliario y electrodomésticos se colocan en un punto cercano al centro de gravedad, lo que contribuye a mejorar la estabilidad.

5.3.2 Cubierta superior

Se decide implementar una superestructura que cubra parte de la cubierta superior para un mayor confort en navegación y una mayor habitabilidad protegida de las condiciones meteorológicas. En consecuencia, la cubierta superior de esta embarcación o cubierta principal se divide en la zona exterior y la zona interior. En la figura 46 se muestra una vista en perfil de la embarcación con un diseño inicial de la superestructura donde se muestra la ubicación de los portillos y otras superficies acristaladas. Además, se incluye una posible disposición de los guardamancebos y de los candeleros, que extienden la eslora total L_{OA} hasta **17,5 metros**.

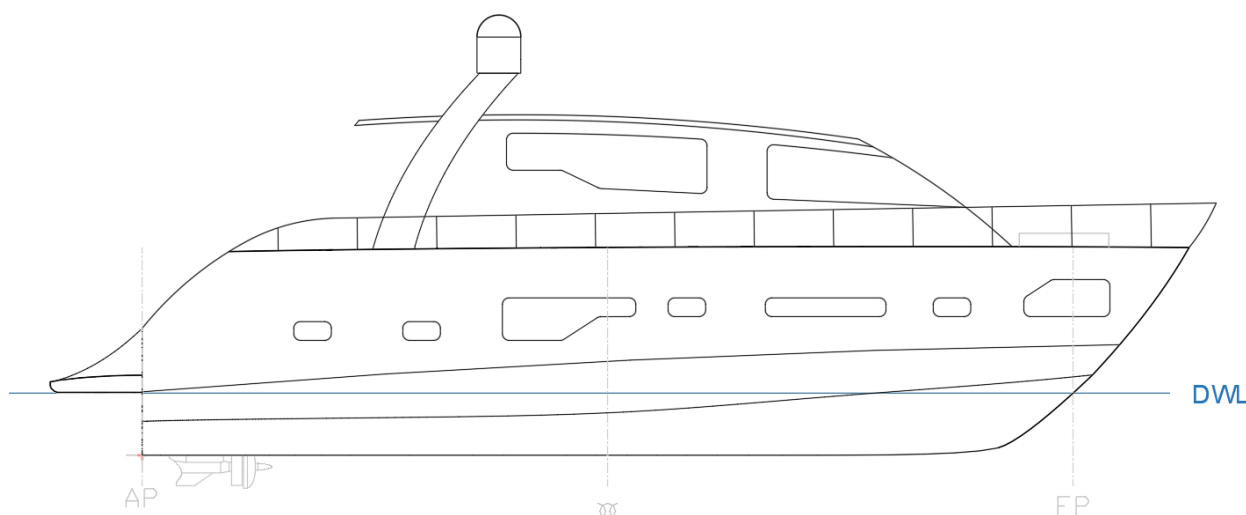


Figura 46. Perfil de la embarcación en AutoCAD

En la zona exterior encontramos las escaleras que dan acceso a la plataforma de baño. A continuación, se encuentran dos sofás, uno de ellos cubierto en parte por el voladizo de la cubierta de la cabina que se ha dispuesto. Bajo el voladizo se encuentra una escotilla por la que se accede a la cámara de máquinas y una puerta corredera que separa la cubierta exterior de la interior. Además, como en la mayoría de embarcaciones de este tipo, se habilita una zona de solárium en la proa.

En la cubierta interior se encuentra un espacio diáfano con tres zonas principales. Primeramente, encontramos una mesa para 6 comensales y una encimera donde albergar un pequeño frigorífico, un microondas y una pica que permitan realizar pequeñas tareas sin necesidad de tener que bajar a la cocina principal. A continuación, se encuentra la zona de salón, con un gran sofá y un mueble para la televisión. Por último, encontramos la escalera que baja a la cubierta inferior y a la zona de control de la embarcación.

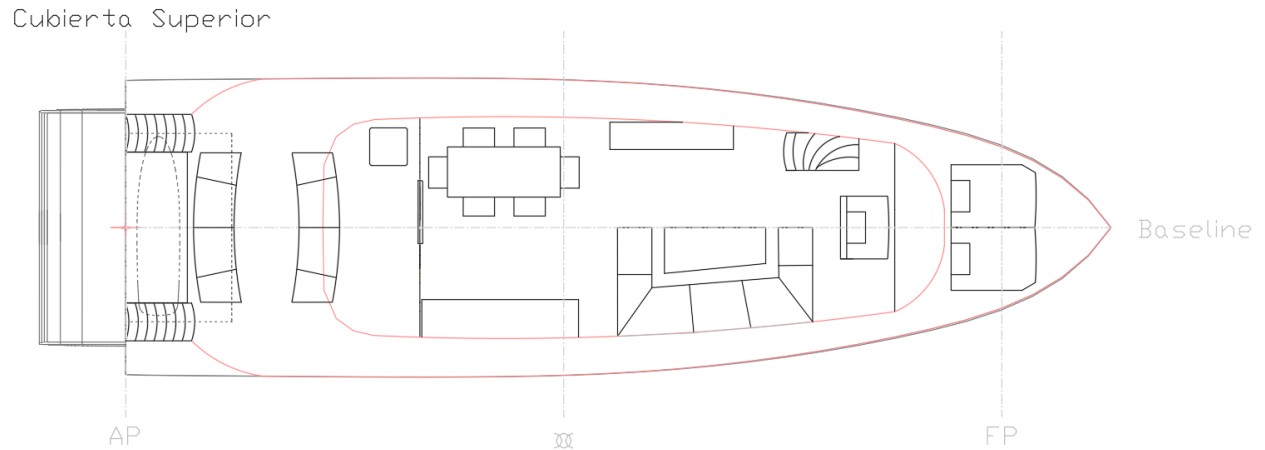


Figura 47. Acomodación cubierta superior en AutoCAD

La disposición mostrada es una primera propuesta, en particular la disposición de la cubierta superior debido a que el espacio es diáfano y los únicos elementos que no podemos mover son los accesos a las cubiertas inferiores. En este sentido, se propone estudiar la posición longitudinal de la superestructura en una siguiente iteración del diseño, ya que puede ayudar a desplazar el centro de gravedad hacia una posición óptima.

Capítulo 6. Diseño estructural

En este capítulo se estudia la configuración del laminado en materiales compuestos que deben tener las distintas superficies que forman el casco de la embarcación, así como los refuerzos longitudinales y transversales, los mamparos y cubiertas y otros elementos. Para determinar el espesor mínimo que se requiere en cada zona se siguen las bases de la norma UNE-EN ISO 12215 -Pequeñas embarcaciones, construcción de casco y escantillones, concretamente en la parte 5— presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación del escantillón.

6.1 Material

Para empezar a definir un casco en materiales compuestos debemos comprender qué es un material compuesto y cuáles son sus particularidades. Como su nombre indica, está formado por distintos materiales. En general, su composición se basa en una matriz asociada a fibras de refuerzo. Los materiales compuestos que se usan en construcción naval son de matriz polimérica y, entre otras, sus principales ventajas son sus buenas propiedades mecánicas, su resistencia a corrosión y, sobre todo, la facilidad que ofrecen para producir formas complejas.

A diferencia de los materiales convencionales, que son isotrópicos, los materiales compuestos tienen distintas propiedades mecánicas en función de la dirección en que se apliquen las fuerzas. Los elementos resistentes de un material compuesto son las fibras o tejidos que forman las capas del laminado. Por tanto, la orientación de las fibras de refuerzo es de suma importancia.

El hecho de poder diseñar un material que resista las tensiones principalmente donde se aplican ayuda a reducir considerablemente el peso en relación a una estructura metálica. Por otro lado, esto implica una complejidad superior en el diseño de la estructura. Por esta razón, deben calcularse las presiones de diseño en los distintos paneles de la embarcación y hay que considerar si la configuración del laminado es suficiente y se adecúa a la norma.

En la construcción de embarcaciones suelen utilizarse matrices con resinas de poliéster, *vinilester*, epoxi y fenólicas. Los materiales de refuerzo pueden ser fibra de vidrio, fibra de carbono o aramida (*kevlar*). Para este proyecto se decide disponer un material compuesto de fibra de vidrio con resinas de poliéster con configuración monolítica o *sandwich* según la zona. La laminación del material será manual, debido a su mayor simplicidad de construcción y a un coste más contenido.

6.2 Norma

La norma UNE-EN ISO 12215-5 es un reglamento que puede aplicarse para *escantillonar* embarcaciones de recreo. Esta norma no contempla ciertas cargas que se aplican sobre el casco, por lo que no sustituye a otros reglamentos de sociedades de clasificación. En consecuencia, deben seguirse las directrices para el dimensionamiento inicial. Una vez se compruebe que cumple la norma, se procede a realizar un cálculo estructural mediante un *software* especializado.

Actualmente la norma ISO incluye un conjunto de programas basados en *MS Excel* con los que calcular las presiones de diseño de los distintos paneles y poder seguir la norma de forma ágil. En el momento de

realizar los cálculos, el módulo 1 para embarcaciones a motor en materiales compuestos no se encuentra disponible. Además, para embarcaciones de categoría de diseño A, B, i C de más de 12 metros de eslora no se asegura el cumplimiento de la norma al usar el programa, por lo que los resultados que se obtengan no verificarían el cumplimiento de la misma.

Existen otros productos de *software* especializados en verificar la composición de los materiales para la estructura del casco de una embarcación de recreo. Por ejemplo, la sociedad de clasificación *Bureau Veritas* dispone el *software ComposeIT*, que ayuda a verificar el cumplimiento de su propia reglamentación sobre materiales compuestos. Además, otras empresas especializadas en *software* estructural en materiales compuestos disponen de módulos dedicados a la validación de Normas, como el caso de la empresa *CompoSIDE*, que verifica el cumplimiento de la norma ISO 12215 y la reglamentación de la Sociedad de clasificación DNV-GL.

Con el objetivo de agilizar el proceso de dimensionamiento del *escantillado* de la embarcación se utiliza el *software SCT R18*, que permite calcular las presiones, analizar el laminado capa a capa y verificar si se cumple el espesor requerido para cada panel de la embarcación. Es un *software* relativamente sencillo que dispone de indicaciones y tutoriales útiles con los que seguir la norma ISO 12215-5 y aplicarla de forma correcta.

6.3 Procedimiento

En este punto se exponen los distintos pasos a seguir para verificar la estructura del casco mediante el programa *SCT R18*. Se expondrán las especificaciones necesarias y los requerimientos de la norma en cada paso sin entrar en detalle sobre los cálculos que realiza el programa, que se expresan en la norma en el caso de querer realizarlos manualmente.

6.3.1 Preparación del modelo

Para aplicar la norma deben calcularse las presiones en distintas planchas de formas sencillas siempre que se posible. Por tanto, deberemos dividir el casco en paneles. Para realizar las divisiones del casco se ha exportado la posición de las cubiertas y tanques dispuestos en el anterior capítulo a *Rhinoceros* y se ha usado este programa para implantar planos de corte.

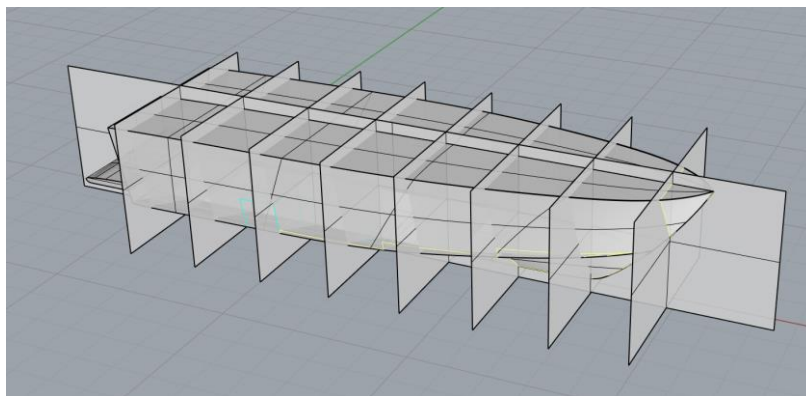


Figura 48. Division de paneles en *Rhinoceros*

Se ha seguido la disposición de cuadernas y se han dejado dos claras de cuaderna entre cada plano de corte transversal. Además, se ha dividido el casco por crujía. De esta forma, el casco queda dividido en cinco zonas principales con hasta nueve paneles de división en cada una de ellas. Estas zonas del casco son el fondo, la línea de codillo, el costado, el espejo y la cubierta superior.

El siguiente paso es conocer las dimensiones máximas y la posición del centro de gravedad de todos los paneles para poder calcular las presiones de diseño en cada uno. Con este objetivo, puede usarse distintos procedimientos. Inicialmente pretendía utilizar la herramienta de cálculo de áreas en *Maxsurf Modeler*, ya que este programa permite copiar una tabla con los datos necesarios para todas las superficies de una sola vez. Sin embargo, la forma en que *Maxsurf Modeler* importa las superficies no permite que éstas queden claramente definidas como superficies individuales de la superficie final del casco. En consecuencia, se exporta la geometría a *CATIA V5* y se usa la función *Mesure Inertica* para cada panel.

La información necesaria que debemos recopilar para posteriormente introducirla en *SCT R18* es la siguiente:

- Posición longitudinal del centro de gravedad
- Posición vertical del centro de gravedad (respecto a la línea de flotación cuando se trate de un panel de costado por encima de ésta)
- Flecha del panel (representa la curvatura, que será importante para los paneles más complejos. Si no es mucha la curva del panel se supone 0)
- Dimensiones máximas panel (ancho y alto)

Una vez se adquieren los datos necesarios para el cálculo de los paneles, se procede a introducir las especificaciones generales de la embarcación en el programa *SCT R18*. Los datos referentes a las dimensiones que se muestran en la Figura 49 quedan definidos por la norma en el punto 6, mientras que el resto de especificaciones hacen referencia a consideraciones que la norma específica en el punto 7 sobre factores de ajuste de la presión (K_{DC} , N_{CG} , K_L , K_{AR} , K_R). El programa aplica los ajustes correspondientes en función del tipo de embarcación, la categoría de diseño, etc.

General Data for scantling	Units	Values given by the User
Study ID		Escantillonado yate
Designer		Alex
Builder		
Building N.		01
Type of Hull		Mono Hull
Design category		A "ocean"
Power or Sail		Motor
Length of the Hull (LH)	m	17.02
Length of the fully loaded waterline at mLDC	m	13.971
Beam of the hull (BH)	m	4.76
Beam of the fully loaded waterline at mLDC	m	3.742
Chine beam	m	3.74
Depth (Dmax)	m	3.12
Draught at mLDC (TC)	m	0.94
Sail area in accordance with ISO 8666	m ²	n.a.
Maximum speed at mLDC	knots	33.5
$w/SQR(Lwl)$ Coefficient		8.963
Operating mode		Planing
Loaded displacement mass of the craft (mLDC)	kg	23176
Mass of craft when towed on trailer	kg	18400
Deadrise angle at 0,4 LWL forward of its aft end	°	22
Water specific gravity	kg/m ³	1025
		n.a.
$Vn/SQR(Lwl) > 6$ (ISO 12215-6 Ch. 6.2)		Longitudinal Strength Analysis is recommended

Figura 49. Datos generales de la embarcación SCT R18

mm, el centro de gravedad longitudinal se sitúa a 0,331 metros, mientras que el vertical desde la línea de flotación está a 0,825 metros

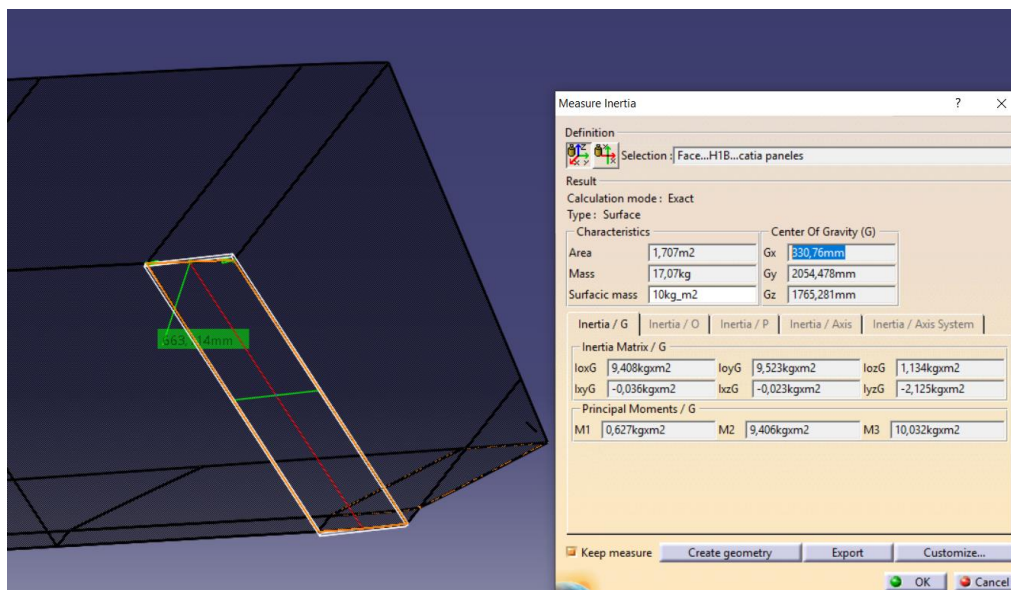


Figura 51. Dimensiones del panel H1B en CATIA V5

Una vez conocidas las dimensiones, las añadimos al programa *SCT R18* y seleccionamos la sección del casco a la que pertenece para que pueda realizar los cálculos respecto a la combinación de laminado específica del panel. También podemos realizar un análisis capa a capa, que el programa exporta en formato del programa *MS Excel*.

Los cálculos por capa serán importantes para los elementos más complejos de la estructura, ya que se podrá comprobar si el laminado resiste otros esfuerzos, como por ejemplo esfuerzos cortantes. Hay que tener presente que para que un material compuesto resista esfuerzos cortantes la adhesión *interlaminar* de las capas debe ser uniforme.

Side H1B : Panel	Units	Values given by the User	As per ISO 12215-5	Direct Calculation
Panel's Composition	4	Costado		
Panel's Material		Glass		
Type of laminate		Roving-Mat combination		
Panel's Location		n.a.		
Mass content of glass	%	36.5		
Thickness	mm	12.696	6.16 (formula 35)	
Deflection	mm	0		
Shorter dimension of plate panel	mm	633.114		
Longer dimension of plate panel	mm	2574.353		
Distance of mid panel from the aft end of LWL	m	0.331		
Height of centre of panel above VWL	m	0.825		
Minimum dry fibre mass por the lay-up	kg/m ²	5.459	2.42	
Panel's weight	kg/m ²	6.9		
Shear Stress interface stiffener/panel	N/mm ²	92		92
SIGMAUF	N/mm ²	7096		139
Shear limit	N/mm ²			13
Modulus of Elasticity	N/mm ²	---		7096
Poisson ratio		---		---
Poisson ratio	N/mm ²	---		2288
In plane shear Modulus	N/mm ²	54		54
In plane shear limit (intralaminar)	N/mm ²	n.a.		
SIGMAUC	N/mm ²	101		101
Design pressure	kN/m ²	---	14.325	
Flexural Moment along "b" direction	N/mm/mm	---	439.241 (formula 34)	
Shear stress at b/2	N/mm	---	4.535 (formula 33)	

Figura 52. Dimensiones del panel H1B en CATIA V5

6.3.4 Cálculo de presiones

Las presiones de diseño son las que se calcula que se producen en cada panel y, por tanto, debemos dimensionar el material para que pueda soportarlas. En la norma se encuentran distintos factores para calcular las presiones, como son la presión hidrostática, el estado de la mar, los posibles impactos o el tipo de embarcación, entre otros.

Para aplicar la norma existen tres métodos de evaluación de las propiedades mecánicas del material. En el método A las propiedades del laminado escogido deberán haber pasado una serie de ensayos en laboratorio que corroboren las propiedades físicas. En el método B se calcularán las propiedades físicas siguiendo los valores de las tablas C.4 a C.7 de la norma. Si no van a realizarse ensayos del material ni conocer la cantidad en masa de fibra del componente de la capa a analizar habrá que utilizar el método C. Hará los cálculos de igual forma que en el método B, a los que aplicará un factor de 0,8 a los valores de las tablas. Optar por este último método penaliza al resultado final, debido a que el espesor requerido será siempre mayor y no se podrá cuantificar el contenido real de fibra del laminado.

En cualquiera de los métodos descritos, se calcula la presión sobre el panel y con este dato se estima el espesor mínimo del laminado conociendo el contenido de fibra del laminado. Este proceso lo realiza el programa, por lo que sólo hay que comprobar que el laminado escogido para cada panel cumpla con el espesor mínimo requerido”.

A continuación, se muestra una tabla con las presiones de diseño y el espesor mínimo requerido para cada panel analizado. Los paneles del fondo se representan con una letra que identifica la zona del casco en la que se ubica (F para el fondo, C para codillo, H para el costado, D en los paneles de cubierta y T en los del espejo), seguido de un número que empieza por 1 en el panel más cercano al eje de coordenadas y, además, la letra B para babor o la E para estribor. Debido a la simetría, el análisis se realiza de la mitad del casco por la línea de crujía.

Panel	Espesor mínimo (mm)	Presión de diseño (Kn/m ²)
F1B	10,88	38,317
F2B	21,93	31,514
F3B	23,99	37,927
F4B	25,94	44,187
F5B	27,67	50,447
F6B	27,74	53,3274
F7B	26,32	54,782
F8B	22,98	59,64
C1B	6,64	83,092
C2B	6,64	94,643
C3B	6,64	113,419
C4B	6,64	132

C5B	6,64	150,698
C6B	6,64	157,476
C7B	6,64	167,528
C8B	6,64	167,528
H1B	6,11	14,31
H2B	17,28	12,574
H3B	17,12	12,574
H4B	17,77	13,547
H5B	18,71	15,078
H6B	18,52	15,242
H7B	17,88	14,8
H8B	16,14	14,809
H9B	11,78	12,574
D1B	3,4	5
D2B	3,4	5
D3B	3,4	5
D4B	3,4	5
D5B	3,4	5,1
D6B	3,4	5,769
D7B	3,4	5,925
D8B	3,4	7,094
D9B	3,4	8,03
T1B	39,056	43,309
T2B	37,622	12,574

Tabla 9. Presiones de diseño y espesores mínimos de cada panel

Las presiones obtenidas tienen valores razonables, igual que el espesor requerido. En el panel de mayor presión de diseño del espejo de popa se ha realizado un análisis capa a capa, que verifica que el laminado en sándwich resistiría esfuerzos cortantes y de torsión en las capas adyacentes al núcleo. Hay que tener en cuenta que una discontinuidad del laminado en este punto puede hacer que el panel pierda totalmente sus propiedades mecánicas

6.4 Laminado Final

Una vez determinados los espesores mínimos requeridos en cada zona del casco, se procede a modificar las capas del laminado para cumplir con el espesor requerido. Para realizar este proceso iterativo de forma más eficiente se decide verificar el laminado únicamente en los paneles donde anteriormente se requería

el mayor espesor. De esta forma se configura un laminado que, a priori, cumpla los requerimientos de la norma ISO en los paneles más críticos y posteriormente se verifica que cumpla también en el resto de paneles.

Hay que tener en cuenta el proceso de laminado del casco cuando se configuran las capas del mismo. El fondo de la embarcación será la zona con mayor espesor y por tanto se dispondrán más capas, pero las zonas contiguas del casco deberán mantener la misma configuración de capas iniciales. Esto es de gran importancia para el proceso de laminado. La configuración debe ser de tal forma que la primera fase del laminado contenga un conjunto de capas uniformes que se aplicarán sobre el molde en su totalidad.

El primer conjunto de capas del laminado aportará una base de unión entre las distintas zonas del casco. A continuación, se realizarán los laminados que aportan refuerzo sobre las zonas donde se requiera. En esta segunda fase la configuración del laminado pueda variar en función de la zona.

6.4.1 Materiales Laminado Casco

Para el material del laminado del casco de esta embarcación se utiliza una combinación de tejidos de fibra de vidrio con resina *isofáltica*. Para el laminado del casco, a excepción del espejo, la configuración será monolítica. Para el espejo, los mamparos estancos y los refuerzos el laminado será sándwich, ya que esta configuración aporta buenas propiedades mecánicas respecto al peso y aísla mejor las vibraciones, el ruido, el frío y el calor. A continuación, se muestra una tabla con los elementos materiales que forman el laminado y sus características principales.

Tipo	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
Textiles		
MAT 300	0,701	0,3
MAT 450	1,051	0,45
MAT 600	1,401	0,6
800RV-450M	2,051	1,25
1700RV-300M	2,991	2
Núcleo		
AIREX C70.75	30	6,15

Tabla 10. Materiales del laminado

Las estructuras textiles de refuerzo principal que se usan son de dos tipos. El *Mat* o fieltro es un tejido de fibras continuas que tiene como objetivo principal mejorar la adherencia *interlaminar*. El *Mat 300* o velo de superficie se usa siempre tras el *gelcoat* y entre fases del laminado con objeto de dar una base de contacto para las capas que se añaden a continuación, mientras que los fieltros de mayor gramaje se usan entre capas de laminado, por ejemplo, antes y después de un tejido como el *Roving*.

El contenido en masa de vidrio de cada capa representa la resistencia del conjunto del laminado. A mayor contenido de fibras resistentes mejores propiedades mecánicas tendrá el material compuesto. Para conseguir un alto contenido de fibras resistentes se decide usar tejidos *Roving* combinados con *Mat*.

Como su nombre indica, un tejido combinado es una capa que incluye dos estructuras textiles. En este caso se incorpora una capa de *Roving 800* con *Mat 450* y de *Roving 1700* con *Mat 300*. Debido a que estas capas cuentan con dos estructuras textiles en una, se reducen las capas del laminado y se obtiene una mejor compactación, por lo que la cantidad de resina a aplicar se reduce.

La aplicación con tejidos combinados para un mismo espesor es más rápida, por lo que se podrán reducir las fases en que se realiza el laminado completo y eliminar de esta forma velos de superficie y resina que sólo contribuyen a un mayor peso total del casco y a un contenido inferior de fibra resistente.

6.4.2 Secuencia del Laminado Casco

En este punto se muestra la configuración de los laminados para cada elemento del casco de la embarcación por orden de capas. Los tejidos combinados cuentan como dos capas de material para tener una referencia del total de capas equivalente a un laminado similar sin usar tejidos combinados.

Empezamos por el fondo de la embarcación. Será el laminado con mayor número de capas, ya que es la zona del barco donde más presiones se producen y, por ende, donde mayor espesor se requiere para soportarlas. Este laminado cuenta con 26 capas en total. Su disposición abarca todo el fondo de la embarcación hasta el costado a 1,196 metros, donde se sitúa la parte superior de la plataforma de baño.

Capa	Fondo	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
1	MAT 300	0,701	0,3
2	MAT 450	1,051	0,45
3	800RV-450M	2,051	1,25
4			
5	800RV-450M	2,051	1,25
6			
7	MAT 300	0,701	0,3
8	MAT 600	1,401	0,6
9	1700RV-300M	2,991	2
10			
11	MAT 300	0,701	0,3
12	MAT 450	1,051	0,45
13	800RV-450M	2,051	1,25
14			
15	800RV-450M	2,051	1,25
16			
17	MAT 300	0,701	0,3
18	MAT 600	1,401	0,6

19	1700RV-300M	2,991	2
20			
21	MAT 300	0,701	0,3
22	MAT 450	1,051	0,45
23	800RV-450M	2,051	1,25
24			
25	800RV-450M	2,051	1,25
26			
Total Fondo			
Contenido Fibra (%)	Modulo elástico	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m²)
37,4	7370	27,743	15,55

Tabla 11. Secuencia laminado Fondo

Por encima de los paneles de fondo se dispone el costado del casco, que tiene 20 capas que coinciden con las primeras 20 capas del fondo, por lo que se lamina a la vez que éste hasta la última capa del costado.

Capa	Costado	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
1	MAT 300	0,701	0,3
2	MAT 450	1,051	0,45
3	800RV-450M	2,051	1,25
4			
5	800RV-450M	2,051	1,25
6			
7	MAT 300	0,701	0,3
8	MAT 600	1,401	0,6
9	1700RV-300M	2,991	2
10			
11	MAT 300	0,701	0,3
12	MAT 450	1,051	0,45
13	800RV-450M	2,051	1,25
14			
15	800RV-450M	2,051	1,25
16			
17	MAT 300	0,701	0,3

18	MAT 600	1,401	0,6
19	1700RV-300M	2,991	2
20			
Total laminado Costado			
Contenido Fibra (%)	Modulo Elástico (N/mm ²)	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
37	7248	20,6	11,4

Tabla 12. Secuencia laminado Costado

Se decide disponer el espejo de popa en configuración sándwich, ya que su disposición transversal es similar a la de los mamparos. En consecuencia, replicaremos este laminado para los mamparos transversales del interior del casco y la superestructura.

Capa	Espejo	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
1	MAT 300	0,701	0,3
2	MAT 450	1,051	0,45
3	800RV-450M	2,051	1,25
4			
5	800RV-450M	2,051	1,25
6			
7	MAT 300	0,701	0,3
8	MAT 600	1,401	0,6
9	AIREX C70.75	30	6,15
10			
11	MAT 300	0,701	0,3
12	MAT 450	1,051	0,45
13	800RV-450M	2,051	1,25
14			
15	800RV-450M	2,051	1,25
16			
17	MAT 300	0,701	0,3
18	MAT 600	1,401	0,6
19	1700RV-300M	2,991	2
20			
Total laminado Espejo			

Contenido Fibra (%)	Modulo Elástico (N/mm ²)	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
35,10	6944	48,999	10,38

Tabla 13. Secuencia laminado Espejo en sandwich

En último lugar, la cubierta. Se realiza con un laminado similar a las primeras capas del laminado del casco, aunque sólo con el objetivo de simplificar el laminado y de reducir los costes de compra de material, ya que las cubiertas no tienen por qué laminarse en conjunto con el casco. De hecho, podría tener una disposición cualquiera, siempre cumpliendo con la norma ISO. Esta configuración se usará también para cubiertas inferiores y los mamparos no estancos. Se recomienda analizar en profundidad estos paneles en un futuro, ya que el espesor obtenido por la ISO no tiene en cuenta las cargas puntales, como por ejemplo el peso de la superestructura.

Capa	Cubierta	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
1	MAT 300	0,701	0,3
2	MAT 450	1,051	0,45
3	800RV-450M	2,051	1,25
4			
5	800RV-450M	2,051	1,25
6			
Total laminado Cubierta			
Contenido Fibra (%)	Modulo Elástico (N/mm ²)	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
37,01	6822	5,853	3,25

Tabla 14. Secuencia laminado Cubierta

6.4.3 Laminado de Refuerzos

Por último, queda definir la configuración del laminado para los refuerzos. Como se ha comentado en el capítulo anterior, para el laminado de los refuerzos estructurales se siguen las recomendaciones del fabricante tanto para soportar al motor como el resto de refuerzos longitudinales y transversales de la embarcación. Dado que no se ha modelado la configuración exacta de los refuerzos, en esta fase del proyecto no se lleva a cabo el cálculo de las presiones.

A continuación se muestra la configuración recomendada por el fabricante que se aplica en los refuerzos comentados. Dado que la función de estos elementos es dar soporte al conjunto estructural del casco, la configuración es más compleja que la que se usa para el casco en sí.

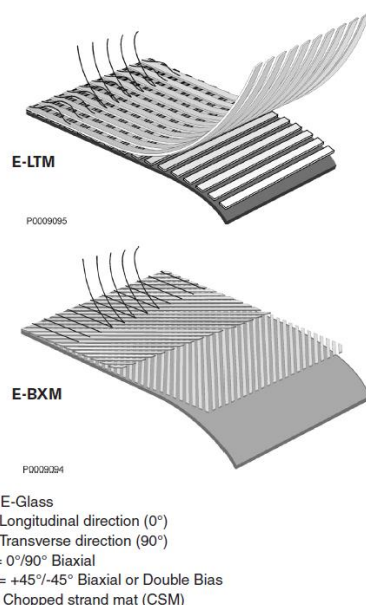


Figura 53. para refuerzos recomendados por Volvo– Fuente – Manual de instalación IPS900

Las capas del laminado son 25 en el caso de una configuración de motores doble o triple. A continuación se muestra el laminado propuesto por el fabricante para los refuerzos. El material del núcleo se deja abierto a la consideración del diseñador, por lo que en este caso se usa el mismo núcleo de 30 mm de espesor escogido para el sándwich del espejo.

Layer no	Mats	Total density, g/m ² (oz/yd ²)	Lamination thickness, mm (in.)
1	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
2	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
3	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
4	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
5	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
6	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
7	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
8	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
9	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
10	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
10.1 (Quad**)	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
11	E-BXM (+45°/-45°)	1075 (31.7)	1.4 (0.06)
12	E-BXM (+45°/-45°)	1075 (31.7)	1.4 (0.06)
13	E-BXM (+45°/-45°)	1075 (31.7)	1.4 (0.06)
14	E-BXM (+45°/-45°)	1075 (31.7)	1.4 (0.06)
15	E-BXM (+45°/-45°)	1075 (31.7)	1.4 (0.06)
15.1 (Quad**)	E-BXM (+45°/-45°)	1075 (31.7)	1.4 (0.06)
15.2 (Quad**)	E-BXM (+45°/-45°)	1075 (31.7)	1.4 (0.06)
16	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
17	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
18	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
19	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
20	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
21	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
22	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
23	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
24	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)
25	E-LTM (0°/90°)	1075 (31.7)	0.9 (0.04)

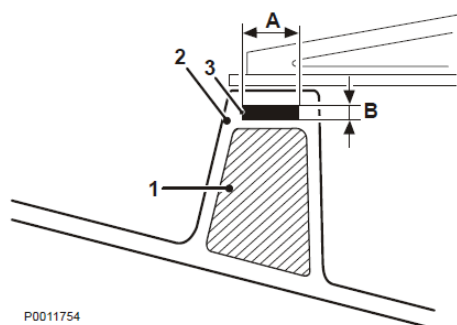
Figura 54. Secuencia de laminado recomendada por Volvo– Fuente – Manual de instalación IPS900

Como se puede apreciar en la tabla 15, el espesor nominal de los refuerzos es de 55 mm, por lo que se reducen mínimamente los 60 mm de espesor para los refuerzos que se habían supuesto inicialmente.

Contenido Fibra (%)	Espesor Nominal (mm)	Peso Seco (kg/m ²)
35,01	55	33,025

Tabla 15. Especificaciones del laminado de los refuerzos

En el caso de los soportes para el motor, el espesor del núcleo deberá aumentarse para cumplir con los requisitos en esa zona. Además, debe incluirse una pletina de 80 mm de ancho y 10 mm de espesor longitudinalmente entre los soportes de motor. Esta configuración se muestra en la figura 55. La variación del laminado en esta zona se deberá tener en cuenta ya que la diferencia de peso puede hacer cambiar el centro de gravedad considerablemente. tendrá en cuenta para el análisis de pesos.



Construction

Build up the bed until it touches the drilling jig along the entire length of the stay.

Use a suitable core material and laminate according to applicable standards (e.g. ISO 12215). Build a galvanized iron strip into the laminate for the engine mounts. Also build in drainage channels so that bilge water is able to run down to the bilge pump.

- 1 Core material
- 2 Fiberglass
- 3 Iron strip

A min. 80 mm (3.1")

B 10 mm (0.4")

Figura 55. Laminado en sección para soportes del motor– Fuente – Manual de instalación IPS900

6.5 Peso Casco

Para calcular el peso total del laminado se puede tomar como referencia el porcentaje de fibra en masa respecto al total. Si conocemos este factor, podemos determinar el peso total del laminado a partir del peso de fibra seca que conocemos del apartado anterior. Como ya se ha explicado, debido a que se escoge el método C de evaluación de propiedades, no podrá conocerse con exactitud el contenido de fibras del laminado, por lo que como orientación tomaremos el porcentaje de fibras.

La variación de peso que puede haber debido a un cambio en el porcentaje de fibra respecto al de resina en un material compuesto puede ser considerable. Además, con técnicas de laminado manual, el porcentaje de fibra puede variar por todo el laminado, por lo que el peso total del mismo puede variar.

Para el este proyecto el objetivo es obtener un peso total de la estructura, para poder calcular el centro de gravedad de la embarcación y proceder a analizar la estabilidad de la misma. Por tanto, para el cálculo del peso del casco se usará la aproximación ya comentada. En la tabla se muestran los valores para el cálculo del peso total del laminado del casco.

Zona	Peso fibra seca (kg/m ²)	Contenido de fibra seca	Peso fibra humedo (kg/m ²)	Área (m ²)	Peso Total (Kg)
Fondo	15,55	37,40%	41,58	62,34	2591,94
Costado	11,40	37,00%	30,81	61,97	1909,28
Espejo	10,38	35,10%	29,57	10,90	322,28
Cubierta	3,25	37,01%	8,78	63,55	558,08

Tabla 16. Peso del casco sin refuerzos

El peso del casco sin refuerzos es de **5.381,59 kilogramos**. En el siguiente capítulo se analizan los pesos de la estructura y de otros elementos en profundidad para estimar la posición del centro de gravedad y el desplazamiento total de la embarcación.

Capítulo 7. Calculo de pesos

En este capítulo se procede a calcular el desplazamiento y la posición del centro de gravedad de la embarcación proyectada. Estos datos son fundamentales para conocer el calado y el trimado final del barco y poder estudiar su estabilidad.

El desplazamiento o peso de la embarcación se descompone en dos pesos principales. El peso en rosca (LWT) y el peso muerto (DWT). Para los cálculos de estabilidad que se realizarán en el siguiente capítulo se requiere conocer el peso en rosca y su posición del centro de gravedad.

El peso en rosca se calcula a partir del peso de la estructura, de la maquinaria, del equipo y del mobiliario instalado. Es decir, todos los elementos fijos que incorpora la embarcación al salir de astillero. Por tanto, deberán conocerse los pesos de todos los elementos y su posición exacta.

El peso muerto tiene en cuenta todos los elementos cuya posición o masa puede variar en distintas condiciones de carga. En este peso se incluyen los fluidos de los tanques y depósitos de la embarcación, y también víveres, pertrechos y pasaje.

7.1 Peso en rosca (LWT)

En este apartado se calcula el peso en rosca de la embarcación. Para empezar, se procede a calcular el peso de la estructura. Como se ha comentado anteriormente en este proyecto, el peso total de la estructura se puede obtener a partir del peso específico de cada elemento estructural, multiplicándolo por su área.

7.1.1 Peso en rosca estructura

Para calcular el centro de gravedad del peso en rosca debe conocerse la posición del centro de gravedad respecto al espejo de popa para cada elemento que conforma la estructura. Debido a la complejidad de las formas del casco se ha utilizado la herramienta *Mesure Inertia* del programa *CATIA V5*. Una vez conocidos los pesos y la posición de cada elemento, se calculan los momentos que producen en todas las componentes. Por último, se suman todos los momentos y se divide entre el peso total de la estructura. De esta forma se obtiene la posición global del centro de gravedad del peso en rosca.

A continuación, se muestra una tabla resumen con los grupos de elementos que se han contemplado para el cálculo del peso en rosca de la estructura y sus componentes. También se muestra el peso en rosca de la estructura y su centro de gravedad.

Elemento	Peso (kg)	Gx (mm)	Gy (mm)	Gz (mm)	Mx	My	Mz
Cubierta	558,08	6888,2	0,0	3095,2	3844,1	0,0	1727,4
Costado	1909,28	7881,7	0,0	2166,9	15048,4	0,0	4137,2
Fondo (hasta plataforma)	2591,94	6377,0	0,0	523,4	16528,9	0,0	1356,7
Espejo	322,28	0,0	0,0	1711,0	0,0	0,0	551,4

Plataforma	141,80	-697,3	0,0	1055,5	-98,9	0,0	149,7
Garaje	403,78	655,7	0,0	2054,1	264,8	0,0	829,4
Suelos	295,90	29578,8	0,0	3110,0	2104,5	0,0	222,8
Mamparos	930,74	38668,2	-1300,0	9277,2	6419,9	-278,3	1710,9
Pique de proa	39,36	14692,0	0,0	2644,2	578,3	0,0	104,1
Refuerzos Longitudinales	964,76	68105,0	0,0	13704,0	4544,6	0,0	735,2
Refuerzos Transversales	614,92	115335,0	0,0	9230,0	2872,9	0,0	342,7
Deposito Agua Dulce	150,60	4191,0	0,0	545,0	631,2	0,0	82,1
Tanque Combustible 1	226,46	4191,0	-1288,0	874,4	949,1	-291,7	198,0
Tanque Combustible 2	226,46	4191,0	1288,0	874,4	949,1	291,7	198,0
Tanque Aguas Negras	153,90	5188,8	0,0	334,3	798,6	0,0	51,4
Superestructura	1779,14	26531,6	0,0	21055,8	9085,7	0,0	7288,8
					XCG (m)	YCG (m)	ZCG (m)
Peso en rosca de la estructura	11309,419 kg				5,705	-0,0246	1,741

Tabla 17. Peso en rosca de la estructura

7.1.2 Peso en rosca maquinaria y mobiliario

Como se ha comentado al inicio de este capítulo, el peso en rosca incluye todo elemento fijo en la embarcación, por lo que debe calcularse, también, el centro de gravedad de los distintos equipos y maquinaria del yate, así como todo el mobiliario dispuesto en las zonas de acomodación. Dado que en este punto del proyecto no se conocen con exactitud las especificaciones del mobiliario dispuesto, se supone el centro de gravedad en el centro geométrico de cada elemento. Los pesos de los muebles y electrodomésticos se han obtenido de distintas marcas de mobiliario y electrodomésticos.

Elemento	Peso (kg)	Gx (mm)	Gy (mm)	Gz (mm)	Mx	My	Mz
Camara de maquinas							
Motor Babor	1800,0	2,003	-0,714	0,683	3605,400	-1285,200	1229,400
Motor Estribor	1800,0	2,003	0,714	0,683	3605,400	1285,200	1229,400
Bombas y equipo auxiliar	200,0	3,720	1,500	0,683	0,000	0,000	0,000
Garaje							
Moto de agua	200,0	0,534	0,000	2,054	106,800	0,000	410,827
Camarote principal	320,0	32,299	-1,338	4,700	2113,021	-39,842	314,100
Cocina	905,9	139,051	10,929	24,381	8436,267	827,705	1478,176
Aseo	76,0	16,369	-2,541	2,827	625,090	-99,133	111,041

Camarote invitados	194,0	18,992	-2,705	3,777	1900,578	-247,932	371,108
Camarote de proa	291,0	74,287	0,602	10,197	3688,629	1,582	534,179
Cubierta superior	812,8	69,822	-1,231	39,014	5787,910	-146,454	2939,395
Cubierta exterior	62,0	25,301	0,000	10,045	343,381	0,000	211,924
					XCG (m)	YCG (m)	ZCG (m)
Peso en rosca maquinaria y mobiliario	6661,723 kg				4,535	0,044	1,325

Tabla 18. Peso en rosca de maquinaria y mobiliario

7.1.3 Peso en rosca total

Una vez obtenido el peso en rosca de la estructura, de la maquinaria y del mobiliario se procede a calcular el peso en rosca total y su posición. Este cálculo se realiza de igual forma a los anteriores. Como se puede ver en la tabla 19, se obtiene un peso de 17.971,143 Kg. Debido a que en esta fase del proyecto no se han considerado los sistemas de la embarcación ni los acabados como revestimientos y moqueta para la zona de acomodación, se supone un 20 % adicional.

Peso en Rosca calculado	Peso en Rosca Total	XCG (m)	YCG (m)	ZCG (m)
17.971,143 Kg	21.565,372 kg	5,2714331	0,00097867	1,58673668

Tabla 19. Peso en rosca y posición del centro de gravedad

El centro de gravedad del peso en rosca se encuentra retrasado respecto al centro de carena y su posición transversal se encuentra muy cercana a la línea de crujía. Estas posiciones son fundamentales para garantizar un trimado cero o ligeramente apopado y una escora nula en situación de equilibrio.

7.1.4 Modificaciones

Los resultados anteriores se obtienen tras realizar ciertos cambios de distribución. A continuación, se expresan brevemente los cambios principales realizados, sin los cuales se hubiese obtenido una posición del centro de gravedad que hubiese provocado que la embarcación en equilibrio se encontrase apopada y con cierta escora.

Para mejorar el trimado se desplaza la posición del tanque de aguas sucias dos cuadernas hacia popa. Además, se reduce su longitud a 1 clara de cuaderna y se aumenta su altura. El volumen final es de 666 litros, ligeramente superior al del primer tanque proyectado, que era de 653 litros. Esta modificación ayuda a retrasar el centro de gravedad, debido a la corrección por superficies libres.

Como se ha comentado anteriormente en este proyecto, la posición de la superestructura no era definitiva y estaba sujeta a posibles modificaciones para contribuir a una posición deseable del centro de gravedad. Para garantizar un asiento apopante o cero en toda condición se decide desplazar dos claras de cuaderna hacia popa toda la superestructura. De esta forma, el perfil de la embarcación es diferente a la inicial, pero la distribución de pesos mejora considerablemente.

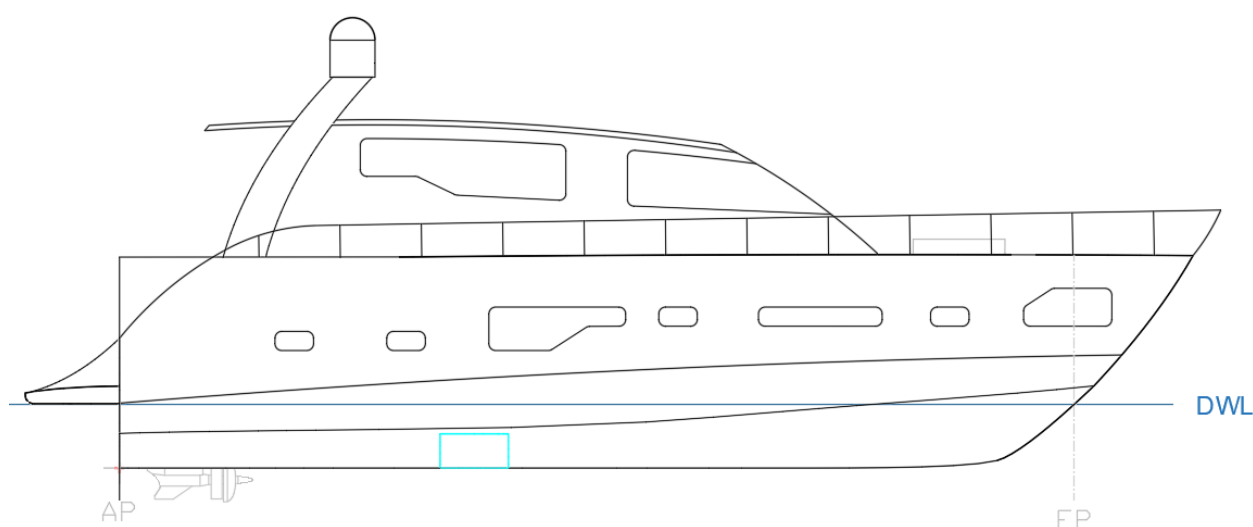


Figura 56. Perfil de la embarcación tras las modificaciones para mejorar el trimado en Auto CAD

Para que la embarcación en equilibrio no escore, se revisan los cálculos en los elementos que no son simétricos respecto a crujía que, en consecuencia, provocan momentos escorantes. El objetivo es tratar de modificar la distribución de forma que estos momentos se anulen y el centro de gravedad transversal se encuentre lo más cercano posible al centro de carena.

Primeramente se ha realizado un cálculo detallado del centro de gravedad de la cocina. Se han dispuesto los elementos de mayor peso, que en este caso son los electrodomésticos, lo más cercanos a la línea de crujía y hacia popa. El resultado es que, en la cocina, que tiene forma de U, se dispone el frigorífico seguido del horno y de la campana extractora en la zona más próxima a popa. A continuación, se encuentra una zona con solamente muebles, con una larga encimera, y se dispone el lavavajillas y fregadero doble en la zona donde termina la U.

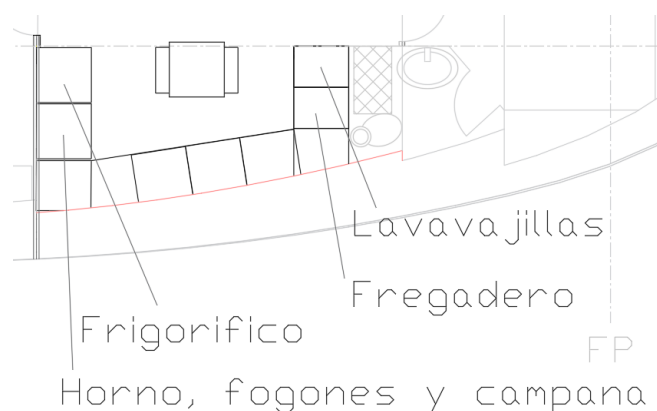


Figura 57. Distribución cocina en Auto CAD

Como se ha visto anteriormente, la posición de elementos pesados desplazados del centro de carena no ayuda a mantener el barco adrizado. El último cambio realizado para conseguir que la embarcación no escore ha sido en la distribución de la cubierta superior. Como se comentó en el capítulo de distribución general, en esta cubierta se encuentra una pequeña zona para realizar tareas básicas de cocina. En su lado

opuesto, hay una mesa para 6 comensales. Se decidió invertir la posición de estos elementos, dejando la mesa a estribor y la pequeña cocina a babor.

7.2 Peso muerto (DWT)

Para estimar el peso muerto de la embarcación se tienen en cuenta los fluidos de los tanques, el peso de los pasajeros, de las provisiones y de los pertrechos. Para calcular el peso muerto se procede a introducir el peso en rosca en el modelo en *Maxsurf Stability* y crear un caso de carga máxima donde se definen los pesos de la carga y de los pasajeros, con los tanques a máxima carga.

Maxima Carga				
	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg
1	Peso en Rosca	1	21565,4	21565,4
2	Tank Comb1	100%	959,8	959,8
3	Tank Comb2	100%	959,8	959,8
4	Tanke AD	100%	649,7	649,7
5	Tank AN	100%	666,7	666,7
6	Personas Proa	1	75,0	75,0
7	Personas Popa	4	75,0	300,0
8	Personas cocina	2	75,0	150,0
9	Piloto	1	75,0	75,0
10	Viveres y pertrec	1	100,0	100,0
11	Total Loadcase			25501,4

Figura 58. Calculo desplazamiento en *Maxsurf Stability*

Como se puede ver en la figura 58, el desplazamiento total de la embarcación a máxima carga es de 25.501,4 Kg. Por lo que si le restamos el peso en rosca se obtiene que el total del peso muerto es de 3.936,03 kg.

$$\Delta_{max} = LWT + DWT$$

$$Lwt = 25501,4 - 21565,372$$

$$LWT = 3936,03 \text{ kg}$$

7.3 Desplazamiento

Como se muestra en el punto anterior, el desplazamiento calculado a través de *Maxsurf* al introducir una condición de máxima carga es de 25.501,4 kg. El resultado es superior al que se ha estimado en los apartados anteriores de este proyecto, por lo que el calado final aumentará. Por otro lado, si se compara con el desplazamiento de embarcaciones similares como las que se analizaron en el estudio estadístico, se corrobora que el desplazamiento tiene un valor dentro del rango habitual, por lo que se considera adecuado.

$$\Delta = 25.501,4 \text{ kg}$$

Capítulo 8. Estabilidad y navegabilidad

En este capítulo se analiza la estabilidad de la de la embarcación proyectada. El objetivo de este apartado es realizar un estudio de estabilidad con distintas condiciones de carga en base a la norma UNE-EN ISO 12217 y verificar si se cumplen los requisitos de diseño para embarcaciones con clase de diseño A.

Primeramente, se analizan las condiciones hidrostáticas con distintos casos de carga y se verifica el cumplimiento de los criterios básicos de estabilidad de la IMO. A continuación, se realizan los ensayos de estabilidad de la norma ISO para comprobar detalladamente la estabilidad.

8.1 Condiciones hidrostáticas

En este punto se definen los casos de carga que se van a utilizar para realizar los distintos ensayos de estabilidad de la embarcación de este proyecto. En el capítulo anterior se ha introducido un caso de máxima carga para obtener el desplazamiento final de la embarcación. De la misma forma, podemos introducir distintos casos de carga en el programa *Maxsurf Stability*.

Con la ayuda del programa de cálculo de estabilidad de *Maxsurf*, verificaremos la condición de equilibrio para cada caso de carga. Además se analizarán, también, los requisitos generales de estabilidad de la IMO, que son aplicables para toda embarcación.

8.1.1 Máxima carga

El ensayo a máxima carga incluye todos los tanques al 100 % de capacidad, ocho pasajeros distribuidos en distintas zonas del barco y también el peso de víveres y de pertrechos diversos. En la figura 59 se muestra la ventana del caso de carga.

Maxima Carga											
	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM kg.m	FSM Type
1	Peso en Rosca	1	21565,4	21565,4			5,271	0,001	1,587	0,000	User Spec
2	Tank Comb1	100%	959,8	959,8	1,143	1,143	4,191	-1,288	0,984	0,000	Maximum
3	Tank Comb2	100%	959,8	959,8	1,143	1,143	4,191	1,288	0,984	0,000	Maximum
4	Tanke AD	100%	649,7	649,7	0,650	0,650	4,192	0,000	0,545	0,000	Maximum
5	Tank AN	100%	666,7	666,7	0,667	0,667	5,189	0,000	0,334	0,000	Maximum
6	Personas Proa	1	75,0	75,0			12,000	0,000	3,100	0,000	User Spec
7	Personas Popa	4	75,0	300,0			1,510	0,000	3,100	0,000	User Spec
8	Personas cocina	2	75,0	150,0			9,452	0,000	0,932	0,000	User Spec
9	Piloto	1	75,0	75,0			9,848	0,000	3,100	0,000	User Spec
10	Viveres y pertrec	1	100,0	100,0			9,518	0,000	0,932	0,000	User Spec
11	Total Loadcase			25501,4	3,602	3,602	5,191	0,001	1,502	0,000	
12	FS correction								0,000		
13	VCG fluid								1,502		

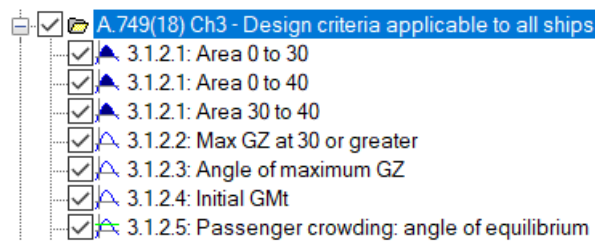
Figura 59. Caso de máxima carga en *Maxsurf Stability*

Tras realizar el análisis a través de la función *Equilibrium*, el programa *Maxsurf* calcula la situación de equilibrio hidrostático. En la ventana de resultados encontramos los parámetros hidrostáticos para la condición de carga específica calculada. Como se muestra en la tabla 21, en la situación de máxima carga el calado es de 0,975 m, la escora es cero y el trimado es de 0,428. Es decir, el casco se encuentra adrizado y ligeramente apopado.

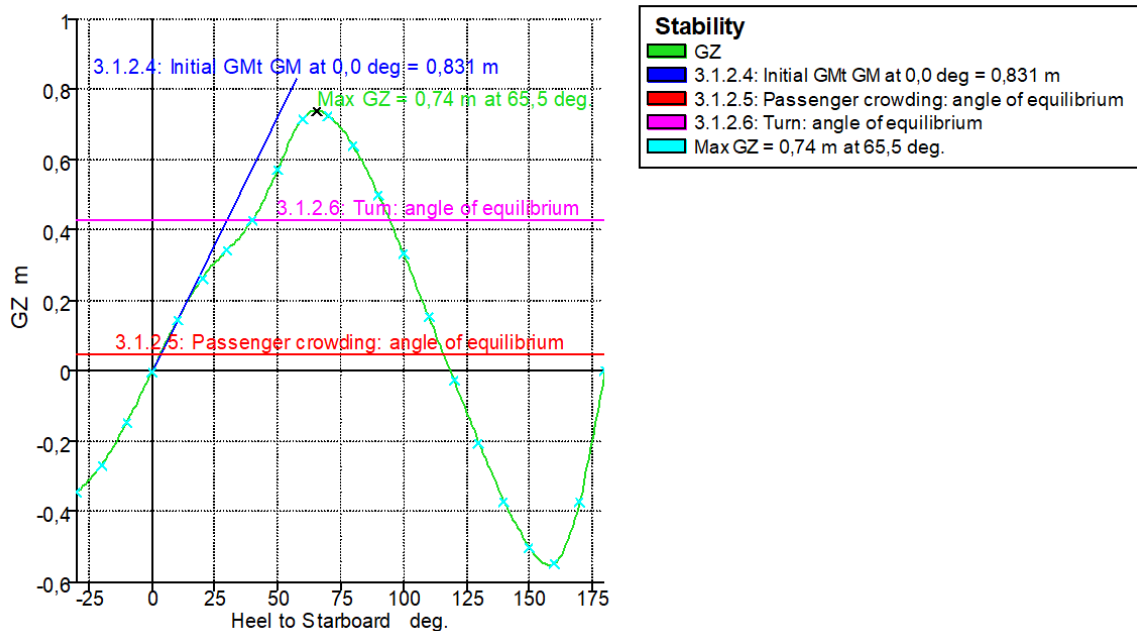
Peso total (kg)	XCG (m)	YCG (m)	ZCG (m)	Calado (m)	Escora (º)	Trimado (º)
25.501,4	5,191	0,001	1,502	0,975	0,00	0,428

Tabla 20. Posición de equilibrio caso de máxima carga

Una vez que hemos verificado que las condiciones de equilibrio son favorables en esta condición, se procede a verificar los criterios de la IMO A.749 (18) Ch3 – *Deing criteria apllicable to all ships*. Este reglamento proporciona unos criterios de estabilidad básicos que toda embarcación debe cumplir. Para realizar el ensayo seleccionamos los criterios del análisis que se muestran en la figura 63 y posteriormente realizamos el análisis *Lage Angle Stability*.

Figura 60. Criterios de análisis IMO realizados en *Maxsurf Stability*

Como se aprecia en la figura 61 se cumplen todos los criterios de estabilidad analizados, ya que el par adrizante es superior al requerido para todos los criterios de estabilidad examinados en el caso de máxima carga. Los resultados muestran un brazo adrizante máximo de 0,74 m a 65,5 grados.

Figura 61. Curva de estabilidad estática para condición de máxima carga en *Maxsurf Stability*

8.1.2 Condición de carga de salida de puerto

En este punto se crea una nueva condición de carga y posteriormente se analiza con el mismo método que se ha expuesto en el punto anterior. La nueva condición se crea suponiendo la carga cuando el barco sale de puerto. Esta condición tiene en cuenta que los tanques de combustible y agua estarán llenos al

100 % y el tanque de aguas negras está lleno solo al 10%. También se supone el peso de los 8 pasajeros, de los víveres y de pertrechos, igual que en condición de máxima carga.

Saliad de puerto											
	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM kg.m	FSM Type
1	Peso en Rosca	1	21565,0	21565,0			5,271	0,001	1,587	0,000	User Spec
2	Tank Comb1	100%	959,8	959,8	1,143	1,143	4,191	-1,288	0,984	0,000	Maximum
3	Tank Comb2	100%	959,8	959,8	1,143	1,143	4,191	1,288	0,984	0,000	Maximum
4	Tanke AD	100%	649,7	649,7	0,650	0,650	4,192	0,000	0,545	0,000	Maximum
5	Tank AN	10%	666,7	66,7	0,667	0,067	5,188	0,000	0,106	1587,289	Maximum
6	Personas Proa	1	75,0	75,0			12,000	0,000	3,100	0,000	User Spec
7	Personas Popa	4	75,0	300,0			1,510	0,000	3,100	0,000	User Spec
8	Personas cocina	2	75,0	150,0			9,452	0,000	0,932	0,000	User Spec
9	Piloto	1	75,0	75,0			9,848	0,000	3,100	0,000	User Spec
10	Viveres y pertrec	1	100,0	100,0			9,518	0,000	0,932	0,000	User Spec
11	Total Loadcase			24901,0	3,602	3,002	5,190	0,001	1,530	1587,289	
12	FS correction								0,064		
13	VCG fluid								1,594		

Figura 62. Caso de salida de puerto en *Maxsurf Stability*

El resultado, tras realizar el análisis de equilibrio hidrostático, es similar al caso de carga anterior. El yate se encuentra adrizado y con trimado positivo, por lo que el resultado es favorable.

Peso total (kg)	XCG (m)	YCG (m)	ZCG (m)	Calado (m)	Escora (°)	Trimado (°)
24.901,0	5,190	0,001	1,530	0,962	0,00	0,390

Tabla 21. Posición de equilibrio caso de salida de puerto

Como se aprecia en la figura 63 se cumplen todos los criterios de estabilidad analizados, ya que el par adrizante es superior al requerido para todos los criterios de estabilidad analizados en el caso de máxima carga. Los resultados muestran un brazo adrizante máximo de 0,66 m a 64,5 grados.

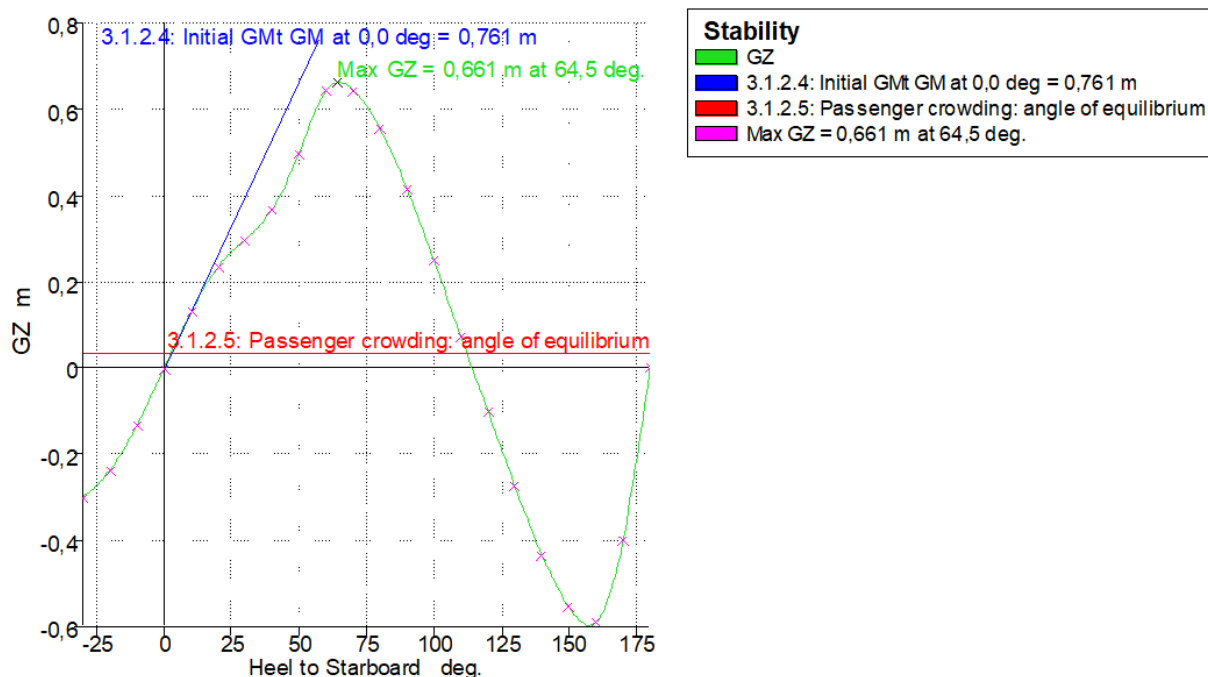


Figura 63. Curva de estabilidad estática para condición Caso de salida de puerto en *Maxsurf Stability*

8.1.3 Condición de carga de regreso a puerto

En este punto se analiza la condición de carga en el supuesto de llegada a puerto de la embarcación tras una larga travesía. En esta condición los tanques de consumo se estima que estarán prácticamente vacíos, al 10%, mientras que el tanque de aguas negras se encuentra lleno, al 100 %. Además se tiene en cuenta el peso de los pasajeros. Los víveres ya se habrían consumido, por lo que se reduce su peso a un 10 %.

Regreso a puerto											
	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM kg.m	FSM Type
1	Peso en Rosca	1	21565,0	21565,0			5,271	0,001	1,587	0,000	User Spec
2	Tank Comb1	10%	959,8	96,0	1,143	0,114	4,186	-1,023	0,467	133,312	Maximum
3	Tank Comb2	10%	959,8	96,0	1,143	0,114	4,186	1,023	0,467	133,312	Maximum
4	Tanke AD	10%	649,7	65,0	0,650	0,065	4,192	0,000	0,316	183,083	Maximum
5	Tank AN	100%	666,7	666,7	0,667	0,667	5,189	0,000	0,334	0,000	Maximum
6	Personas Proa	1	75,0	75,0			12,000	0,000	3,100	0,000	User Spec
7	Personas Popa	4	75,0	300,0			1,510	0,000	3,100	0,000	User Spec
8	Personas cocina	2	75,0	150,0			9,452	0,000	0,932	0,000	User Spec
9	Piloto	1	75,0	75,0			9,848	0,000	3,100	0,000	User Spec
10	Viveres y pertrec	1	10,0	10,0			9,518	0,000	0,932	0,000	User Spec
11	Total Loadcase			23098,6	3,602	0,960	5,273	0,001	1,563	449,707	
12	FS correction								0,019		
13	VCG fluid								1,582		

Figura 64. Caso de regreso a puerto en *Maxsurf Stability*

En esta condición de carga se verifica que la embarcación continúa adrizada y el trimado es positivo. En definitiva, la embarcación tiene un buen equilibrio hidrostático a distintas condiciones de carga.

Peso total	XCG (m)	YCG (m)	ZCG (m)	Calado (m)	Escora (°)	Trimado (°)
23098,6	5,273	0,001	1,563	0,928	0,00	0,0446

Tabla 22. Posición de equilibrio caso de regreso a puerto

Como se muestra en la figura 65 se cumplen todos los criterios de estabilidad analizados, ya que el par adrizante es superior al requerido para todos los criterios de estabilidad analizados en el caso de máxima carga. Los resultados muestran un brazo adrizante máximo de 0,68 m a 65,5 grados.

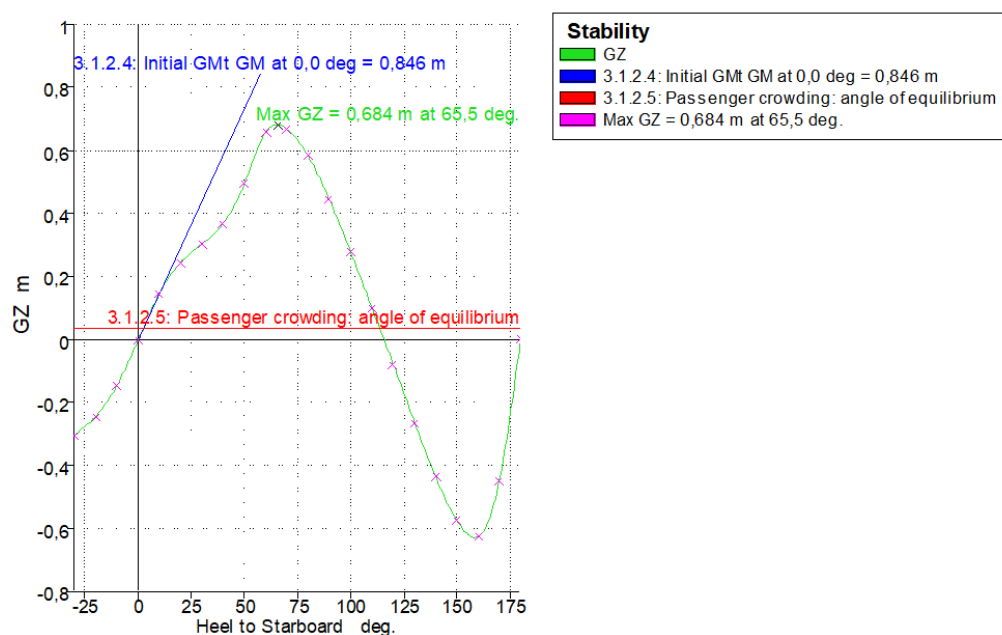


Figura 65. Caso de regreso a puerto en *Maxsurf Stability*

8.2 Ensayos de estabilidad ISO 12217

Una vez verificado el cumplimiento de los requisitos básicos, se procede a ensayar la estabilidad con criterios específicos para el tipo de embarcación que se proyecta. De la norma UNE-EN ISO 12217 - Evaluación y clasificación de la estabilidad y la flotabilidad - se debe consultar la parte uno, que es la que hace referencia a embarcaciones no propulsadas a vela con eslora superior a 6 m.

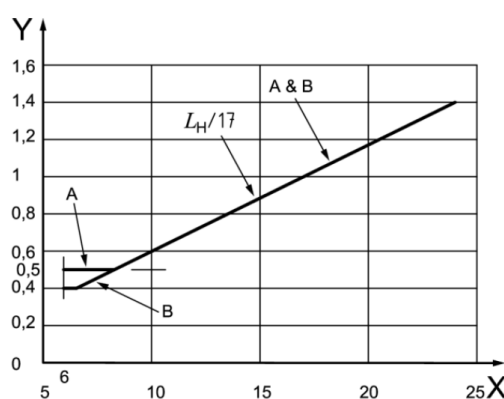
En el punto 5.3 de la norma se especifican los ensayos a realizar en función de la categoría de diseño que se quiera verificar. Para que se otorgue una categoría de diseño deben satisfacerse todos los requisitos aplicables a dicha categoría. Para este proyecto se busca una categoría de diseño A, por lo que según la tabla 2 de la norma se deberán cumplir los requisitos que se muestran a continuación.

8.2.1 Alturas de inundables

En el punto 6.1.1 de la norma se especifican los requisitos referentes a las aberturas que puedan permitir la entrada de agua en la embarcación. Las aberturas que se dispongan en la embarcación de clase de diseño A deben estar a un mínimo de 0,2 metros sobre la línea de flotación en situación de carga máxima. En la embarcación proyectada se cumple esta condición, ya que el primer espacio inundable es el garaje, que también cumple con el resto de especificaciones requeridas.

En el punto 6.1.2 se especifica el ensayo de inundación que debe efectuarse para garantizar el margen de franco bordo en la condición de carga máxima. Este ensayo se puede realizar de distintas formas. Para el propósito de este proyecto se calculará con la ayuda de *Maxsurf Stability*.

Para realizar el ensayo se mide la altura desde la línea de flotación hasta el punto o los puntos por los que podría comenzar a entrar agua. Para la embarcación proyectada el primer elemento inundable es el garaje, que no se tendrá en cuenta debido a que se puede cerrar de forma estanca y cumple también con los requisitos del apartado 6.1.1.6 de la norma ISO 12217-1. Por tanto, la primera abertura inundable la encontramos en la escotilla de cámara de máquinas, a 2,715 metros de la línea de flotación a máxima carga.



a) Categorías de diseño A y B

Leyenda

X Eslora del casco (m)

Y Altura requerida de inundación (m)

Figura 66. Altura requerida de inundación – ISO 12217-1

Existen varios métodos para calcular la mínima altura inundable requerida y la embarcación cumple todos y cada uno de los métodos expuestos en la norma. En la Figura 67 se muestra la tabla con la que calcular la altura de inundación a partir de la eslora. En una siguiente vuelta de la espiral de diseño se propone estudiar la posición de los portillos con este método y verificar que cumplan la norma. Por el momento se han supuesto totalmente estancos, ya que la disposición de portillos y ventanas no se ha estudiado en el proyecto.

En el punto 6.1.3 debe estudiarse si el ángulo de inundación cumple los requisitos de la tabla 3. Como se ha comentado, para compartimentos marcados con “manténgase cerrado en navegación” y que su cierre sea estanco, no se requiere ensayo. Por tanto, debe comprobarse que la escotilla de cámara de máquinas no se inunde a una escora inferior al ángulo mínimo de inundación.

Categoría de diseño	Ángulo mínimo de inundación grados	
	Opciones 1 y 3 ^a , utilizar el que sea mayor	
A	$\phi_0 + 25$	30

Figura 67. Ángulo mínimo de inundación – ISO 12217-1

Para calcular el ángulo de escora se usa la fórmula del anexo C:

$$\phi_0 = 11,5 + \frac{(24 - L_H)^3}{520} = 12,596^\circ$$

Según la tabla el ángulo mínimo será: $\phi_I = 12,59 + 25 = 37,596^\circ$

Por último, en el anexo C se calcula el ángulo de inundación más crítico, mediante la inversa de la tangente de la altura de inundación de la abertura entre la posición transversal de la propia abertura hasta el centro de crujía:

$$\phi_D = \tan^{-1} \left(\frac{(Z_D)}{(Y'_D)} \right)$$

$$\phi_D = \tan^{-1} \left(\frac{2,715}{1,588} \right) = 59,677^\circ$$

Dado que el ángulo crítico es claramente mayor al ángulo de inundación, se confirma el cumplimiento de los requisitos de inundación para la embarcación proyectada.

8.2.2 Ensayo de compensación de cargas

El ensayo de compensación de pesos se encuentra en el punto 6.2 de la norma. Consiste en verificar si la embarcación cuenta con estabilidad suficiente para sobrellevar distintas posiciones de carga que puedan comprometer la estabilidad de la embarcación en una situación puntal.

Los métodos de ensayo de compensación de pesos se encuentran en el anexo B de la norma. Para la embarcación proyectada deberemos suponer dos condiciones de carga: LC1 y LC2. En ambas condiciones de carga la embarcación deberá tener los tanques al 50%, ya que el tanque de aguas negras no cumple con el requisito B3.1.3.

En el primer caso de carga (LC1) se procede a introducir la posición de la tripulación de forma que el LCG de la tripulación se encuentre al 75% de la eslora máxima dentro de la zona habitable hacia proa. Y centrada en el centro de crujía. El peso de la tripulación será a razón de 85 kg por persona. En el segundo caso de carga (LC2) se debe disponer a la tripulación de forma que el LCG se encuentre al 25% de la eslora máxima de la zona de la tripulación.

Se procede a introducir los dos nuevos casos de carga en *Maxsurf Stability*, de la misma forma en que se ha realizado en este capítulo anteriormente. De esta forma se puede realizar y verificar el ensayo según las especificaciones de la norma. A continuación, se muestran las especificaciones definidas para ambos casos de carga.

LC1										
	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m³	Total Volume m³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM kg.m
1	Peso en Rosca	1	21565,4	21565,4			5,271	0,001	1,587	0,000
2	Tank Comb1	50%	959,8	479,9	1,143	0,571	4,190	-1,233	0,721	133,312
3	Tank Comb2	50%	959,8	479,9	1,143	0,571	4,190	1,233	0,721	133,312
4	Tanke AD	50%	649,7	324,9	0,650	0,325	4,192	0,000	0,417	183,083
5	Tank AN	50%	666,7	333,3	0,667	0,333	5,189	0,000	0,237	1587,289
6	Personas Proa	2	85,0	170,0			12,000	0,000	3,100	0,000
7	Personas Popa	3	85,0	255,0			1,510	0,000	3,100	0,000
8	Personas cocina	0	85,0	0,0			9,452	0,000	0,932	0,000
9	Piloto	1	85,0	85,0			9,848	0,000	3,100	0,000
10	Viveres y pertrec	1	100,0	100,0			9,518	0,000	0,932	0,000
11	Total Loadcase			23793,4	3,602	1,801	5,254	0,001	1,547	2036,996
12	FS correction								0,086	
13	VCG fluid								1,632	

Figura 68. Caso de carga LC1 en *Maxsurf Stability*

LC2										
	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m³	Total Volume m³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM kg.m
1	Peso en Rosca	1	21565,4	21565,4			5,271	0,001	1,587	0,000
2	Tank Comb1	50%	959,8	479,9	1,143	0,571	4,190	-1,233	0,721	133,312
3	Tank Comb2	50%	959,8	479,9	1,143	0,571	4,190	1,233	0,721	133,312
4	Tanke AD	50%	649,7	324,9	0,650	0,325	4,192	0,000	0,418	183,083
5	Tank AN	50%	666,7	333,3	0,667	0,333	5,189	0,000	0,237	1587,289
6	Personas Proa	0	75,0	0,0			12,000	0,000	3,100	0,000
7	Personas Popa	7	75,0	525,0			1,510	0,000	3,100	0,000
8	Personas cocina	0	75,0	0,0			9,452	0,000	0,932	0,000
9	Piloto	1	75,0	75,0			9,848	0,000	3,100	0,000
10	Viveres y pertrec	1	100,0	100,0			9,518	0,000	0,932	0,000
11	Total Loadcase			23883,4	3,602	1,801	5,162	0,001	1,552	2036,996
12	FS correction								0,085	
13	VCG fluid								1,638	

Figura 69. Caso de carga LC2 en *Maxsurf Stability*

El ángulo de escora máximo no debe sobrepasar el ángulo de escora (ϕ_0) calculado en el anterior apartado, o bien el que se especifica en la norma según la eslora ($\phi_{0(R)}$).

$$\phi_0 = 11,5 + \frac{(24 - L_H)^3}{520} = 12,596^\circ$$

L_H (m)	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0
$\phi_{0(R)}$ (°)	22,7	20,9	19,4	18,0	16,8	14,8	12,9	11,9	11,6	11,5

Figura 70. Ángulo de escora en equilibrio máximo según eslora – ISO 12217-1

Una vez conocidos los datos para el ensayo, se introduce el ángulo de escora máximo en la ventana *criteria* y se procede a realizar el ensayo de equilibrio para el caso de carga LC1 y LC2. Como se puede apreciar en las figuras 71 y 72, se cumple el requisito para ambos casos de carga.

Large Angle Stability - LC1 - Intact							
	Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
1	ISO 12217-1	6.2 Offset load test - equilibrium with heel ar					
2		Heeling arm = $A / \text{disp.} \cdot \cos^n(\phi)$					
3		A =	0,000	kg.m			
4		n =	0				
5		Intermediate values					
6		Heel arm amplitude		m	0,000		
7							
8	ISO 12217-1	6.2 Offset load test - equilibrium with heel ar				Pass	
9		6.2 Offset load test - equilibrium with heel arm					
10		shall not be greater than (\leq)	12,6	deg	0,1	Pass	+99,50
11							

Figura 71. Resultados de ensayo de carga de compensación de carga LC1 en *Maxsurf Stability*

Large Angle Stability - LC2 - Intact							
	Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
1	ISO 12217-1	6.2 Offset load test - equilibrium with heel ar					
2		Heeling arm = $A / \text{disp.} \cdot \cos^n(\phi)$					
3		A =	0,000	kg.m			
4		n =	0				
5		Intermediate values					
6		Heel arm amplitude		m	0,000		
7							
8	ISO 12217-1	6.2 Offset load test - equilibrium with heel ar				Pass	
9		6.2 Offset load test - equilibrium with heel arm					
10		shall not be greater than (\leq)	12,6	deg	0,1	Pass	+99,48
11							

Figura 72. Resultados de ensayo de carga de compensación de carga LC1 en *Maxsurf Stability*

8.2.3 Ensayo de resistencia a las olas y viento

El ensayo de resistencia a olas y viento que se encuentra en el punto 6.3.2 de la norma UNE-EN ISO 12217 pretende analizar la estabilidad del barco teniendo en cuenta el efecto del viento sobre la obra muerta y las olas que hacen balancear a la embarcación transversalmente. Deberá verificarse que en esta condición la escora del barco no sobrepase el ángulo de inundación.

Para analizar el balance transversal debido a las olas y al viento, se procede a realizar un análisis de escora a grandes ángulos en *Maxsurf Stability*, definiendo el criterio de análisis según la norma.

El momento escorante que produce el viento se supone constante para el ensayo. Para calcular el momento de escora debido al viento (M_w) se usa la fórmula 2:

$$M_w = 0,53 A'_{LV} \times h \times h \times v_w^2$$

h Es la distancia vertical entre centro geométrico de las superficies que conforman A_{lv} y el perfil del área sumergida

V_w Es la velocidad del viento, 28 m/s par categoría de diseño A.

A'_{LV} Corresponde a la superficie expuesta al viento. Debe ser mayor a $0,5L_H B_H$

El ángulo de retorno previsto para categoría de diseño A se calcula, siendo V_d el volumen del desplazamiento en metros cúbicos, con la siguiente expresión:

$$\phi_R = 25 + \frac{20}{V_D} = 25,84^\circ$$

Para verificar las condiciones del ensayo de resistencia al viento se usa el criterio de la ISO en *Maxsurf Stability*. Los datos que se introducen para el ensayo vienen dados por la norma comentada o bien se especifica cómo calcularlos. El área de la superficie expuesta al viento es de 44,339 m², que es mayor al requerido por la norma, por lo que se procede a realizar el ensayo.

Tras introducir todos los datos necesarios queda especificado el criterio de evaluación. Una vez se realiza el análisis de estabilidad a grandes ángulos, se verifica el cumplimiento de los requisitos. A continuación, se muestra la tabla de resultados y la curva evaluada de brazos adrizantes.

Large Angle Stability - Minima operativa - Intact							
	Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
1	ISO 12217-1	6.3.2 Wind heeling arm					
2		Wind arm = $a v^2 A (h - H) / (g \text{ disp.}) \cos^n(\phi)$					
3		constant: $a (0.5 \rho_{\text{air}} C_d) =$	0,53	kg/m ³			
4		wind velocity: $v =$	54,428	kn			
5		area centroid height (from zero point): $h =$	2,996	m			
6		total area: $A =$	44,339	m ²			
7		height of lateral resistance: $H =$	0,523	m			
8		cosine power: $n =$	0				
9		gust ratio	1				
10		Intermediate values					
11		Heel arm amplitude		m	0,209		
12							
13	ISO 12217-1	6.3.2 Rolling in beam waves and wind				Pass	
14		6.3.2 Wind heeling arm (steady)					
15		Area1 integrated from the greater of					
16		spec. heel angle	25,0	deg	25,0		
17		to the lesser of					
18		spec. heel angle	59,7	deg	59,7		
19		first flooding angle of the DownfloodingPoints	n/a	deg			
20		angle of vanishing stability (with heel arm)	102,2	deg			
21		Area2 integrated to the lesser of					
22		roll back angle from equilibrium (with heel arm)	25,8 (-9,0)	deg	-9,0		
23		roll back to equilibrium (ignoring heel arm)	0,1	deg			
24		roll back to specified heel angle	0,0	deg			
25		Area1 / Area2 shall be greater than (>)	100,00	%	164,31	Pass	+64,31
26		Intermediate values					
27		Equilibrium angle with heel arm		deg	16,8		
28		Area1 (under GZ), from 25,0 to 59,7 deg.		m.deg	13,5613		
29		Area1 (under HA), from 25,0 to 59,7 deg.		m.deg	7,2348		
30		Area1, from 25,0 to 59,7 deg.		m.deg	6,3265		
31		Area2 (under GZ), from -9,0 to 25,0 deg.		m.deg	3,2532		
32		Area2 (under HA), from -9,0 to 25,0 deg.		m.deg	7,1036		
33		Area2, from -9,0 to 25,0 deg.		m.deg	3,8504		
34							

Figura 73. Resultados de ensayo viento y olas en *Maxsurf Stability*

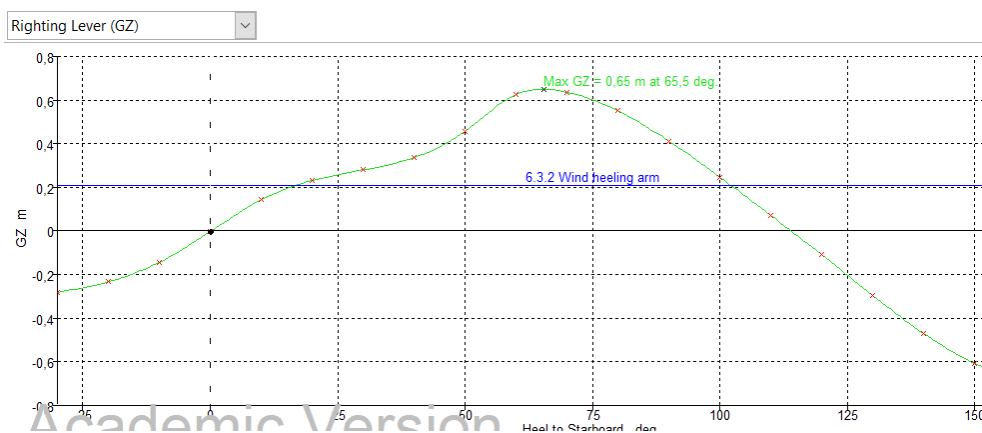


Gráfico 17. Curva Gz para ensayo de balance *Maxsurf Stability*

En último lugar se procede a realizar únicamente el ensayo de resistencia a olas. Este análisis es muy similar al anterior. El objetivo es corroborar que con el barco escorado a 30 grados o más, el momento del par adrizante sea de mínimo 25 kN·m, lo que aportara una buena reserva de estabilidad. Además la palanca de par de adrizamiento a 30 grados debe ser mayor a 0,2 m.

Large Angle Stability - Minima operativa - Intact							
	Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
1	ISO 12217-1	6.3.3 Resistance to waves (Value of GZ)				Pass	
2		heel angle at which required GZ is constant	30,0	deg			
3		required value of GZ at this angle is	0,200	m			
4		limited by first flooding angle of the DownfloodingPoint	n/a	deg			
5		GZ at 30,0 deg shall be greater than (>)	0,200	m	0,280	Pass	+40,00
6		Intermediate values					
7		angle at which max. GZ occurs		deg	65,5		
8							
9	ISO 12217-1	6.3.3 Resistance to waves (Value of RM)				Pass	
10		heel angle at which required RM is constant	30,0	deg			
11		required value of RM at this angle is	25000,000	N.m			
12		limited by first flooding angle of the DownfloodingPoint	n/a	deg			
13		RM at 30,0 deg shall be greater than (>)	25000,000	N.m	61180,450	Pass	+144,72
14		Intermediate values					
15		angle at which max. GZ occurs		deg	65,5		
16							

Figura 74. Resultados de ensayo de estabilidad con olas en *Maxsurf Stability*

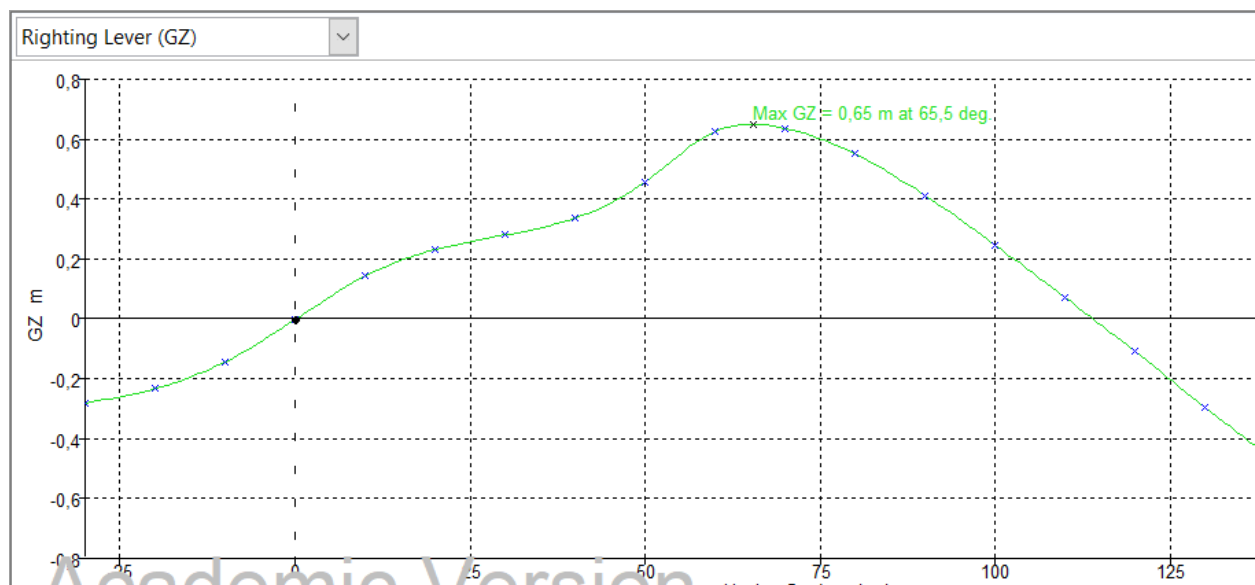


Gráfico 18. Curva Gz para ensayo de estabilidad con olas *Maxsurf Stability*

8.3 Evaluación de los ensayos

Como se ha comentado al inicio de este capítulo, para validar la categoría de diseño que se le otorga a una embarcación ésta debe cumplir con todos los requerimientos de estabilidad dispuestos en la norma ISO 12217-1. Para este proyecto se pretendía obtener la categoría de diseño A, por lo que tras verificar todos los análisis realizados se observa que el estudio completo es favorable. A continuación, se muestra la tabla 6 de la norma donde se resumen las características de cada categoría de diseño.

Parámetro	Categoría de diseño			
	A	B	C	D
Fuerza Beaufort característica del viento	≤ 10	≤ 8	≤ 6	≤ 4
Altura de ola hasta	aproximadamente 7 m significativa	4 m significativa	2 m significativa	0,3 m significativa 0,5 m máxima
Velocidad del viento media máxima sobre 10 min	24,4 m/s	20,7 m/s	13,8 m/s	7,9 m/s

Figura 75. Resumen de las definiciones de las categorías de diseño – ISO 12217-1

A destacar que a pesar de que la norma recomienda un caso de carga particular para cada ensayo, se ha comprobado que se cumplen todos los requisitos en cualquiera de las condiciones de carga. Por otro lado, hay que tener en cuenta que el proyecto se encuentra en una fase inicial y habrá que revisar el cumplimiento de todos los requerimientos de la norma cuando se realice la siguiente vuelta de la espiral de diseño.

Un aspecto importante es valorar si es necesaria o no la certificación de la categoría de diseño A, ya que si la embarcación no navega en zona de navegación 1, su incorporación comportaría un mayor coste productivo para el astillero y de operación para el armador. Al fin y al cabo, la embarcación proyectada es de planeo y su autonomía no permite realizar largas travesías como sería cruzar el océano Atlántico.

Conclusión

El principal objetivo de este proyecto era realizar una vuelta completa de la espiral de diseño, de forma que se consiguiera una propuesta de embarcación con una sólida base antes de proceder a la realización de una segunda vuelta de la espiral. Para conseguir completar todas las fases de diseño se requiere que a medida que el proyecto va tomando forma, se vayan cumpliendo ciertos requisitos, tanto en cuanto a recomendaciones generales como específicas, definidas en normas ISO u otras. Por consiguiente, se van haciendo las modificaciones necesarias para ir avanzando en el proyecto.

La principal dificultad para el desarrollo de este estudio ha sido mi falta de fluidez con herramientas de dibujo asistido por ordenador en 3D como *Rhinoceros* o *Catia V5*. Son programas en los que hay que invertir mucho tiempo para aprender sus principales funcionalidades. También hay que conocer los formatos en que trabajan para poder exportar datos y modelos a otros programas. El hecho de no dominar estas herramientas implica tener que efectuar cálculos previos mediante hojas de cálculo, lo que ralentiza algunos procesos.

Una herramienta básica en el diseño del casco ha sido el *plug-in Orca 3D* para *Rhinoceros*. Este potente *software* permite modelar las formas de la embarcación según una gran variedad de dimensiones características. Además, es capaz de evaluar parámetros y coeficientes hidrostáticos en tiempo real, por lo que consigue optimizar las formas a un cierto nivel ya en una primera iteración.

En el análisis de la resistencia al avance para embarcaciones en régimen de planeo se han conseguido unos resultados favorables, como lo demuestra el hecho de que la potencia requerida para alcanzar los 33,5 nudos es similar al de otras embarcaciones con la misma filosofía de diseño que existen en el mercado. Como no se han analizado elementos de soporte hidrodinámico como *spray-rails* o *flaps* en el espejo de popa, se recomienda estudiar la incorporación de estos elementos mediante un *software* específico de análisis de fluidos (CFD).

Al no haber diseñado un modelo completo de la embarcación en 3D, aparecieron problemas con el cálculo de pesos. Una posición adelantada de la superestructura y un cálculo desproporcionado de los refuerzos del casco hacían que el centro de gravedad estuviese demasiado adelantado, lo que provocaba que la embarcación en equilibrio estuviese aproada. Al analizar en detalle el cálculo de pesos, se realizan diversos cambios en la distribución con los que se consigue un trimado positivo y una escora cero en equilibrio hidrostático.

Entre los principales cambios realizados para mejorar la distribución de pesos, se modifica la situación, la forma y, consecuentemente, la capacidad del tanque de aguas negras. Como se ha comentado en relación a los tanques de aguas grises y aguas negras, en una futura iteración deberá estudiarse la capacidad y la disposición de los mismos en conjunto con los sistemas de la embarcación.

El uso de un programa como *STC R18* y el del módulo de análisis de criterios de estabilidad que incorpora *Maxsurf Stability* permiten verificar el cumplimiento de las normas ISO de forma sencilla. En el *SCT R18* podemos introducir un primer escantillón e ir iterando hasta conseguir los resultados deseados según los requerimientos de la norma ISO 12215. En una futura iteración se propone analizar la estructura conjunta del casco y de los refuerzos del mismo mediante un software de análisis estructural como *RAM Series*.

En *Maxsurf Stability* podemos verificar los criterios de estabilidad y repetir los ensayos tras las modificaciones necesarias en el modelo inicial. Se recomienda estudiar la incorporación de portillos practicables y analizar el cumplimiento de la norma mediante el procedimiento comentado. También se requerirá el ensayo de altura inundable para las ventilaciones de los motores y el extractor de humos de la cocina, con el objetivo de verificar que se mantenga la condición de categoría de diseño obtenida.

De los estudios de estabilidad destaca el cumplimiento de todos los ensayos requeridos para la certificación de la categoría de diseño A. Esta condición es la más crítica, por lo que su verificación confirma que la embarcación proyectada tiene efectivamente una buena reserva de estabilidad. Esto permitiría que navegara en condiciones meteorológicas adversas. Es cierto, sin embargo, que producir una embarcación de esta categoría sería más costoso. Habría que valorar la viabilidad económica de obtener esta homologación, dado que su autonomía no permite realizar largas travesías.

En este trabajo se han realizado una serie de estudios que han permitido completar la primera vuelta de la espiral de diseño de forma satisfactoria. Se ha desarrollado todo un abanico de procedimientos que ha permitido cumplir las especificaciones preliminares. También se han planteado una serie de deducciones y sugerencias de cara a una segunda vuelta de la espiral de diseño.

Referencias

Bibliografia

- MARINE DESIGN FOR RHINOCEROS (ORCA 3D). *Orca3D User Manual*. [en línea]. [fecha de consulta: mayo de 2019]. Disponible en: https://orca3d.com/wp-content/uploads/2019/04/Orca3D_Help.pdf
-
- VOLVO PENTA. *Boletín de producto IP S800/950*. [en línea]. [fecha de consulta: mayo de 2019]. Disponible en: <https://www.volvopenta.es/marineleisure/es-es/products/motor-yacht/ranges/volvo-penta-ips/ips950/document.html>
- VOLVO PENTA. *Installation IPS 3*. [en línea] [fecha de consulta: 2019]. Disponible en: http://muldermotoren.nl/volvopentadvd/marine/productpage/ips900/f_ips_900.html

Webgrafia

- BENTLEY. *Bentley: Advancing Infrastructure*. [en línea] [fecha de consulta: 2019] Disponible en: <https://www.bentley.com/>
- ENVALES ENVALESCOM. *Aprende a escantillonar en pocos minutos con el SCT. Refuerzos. Parte 1*. [en línea] En: *Youtube*. 6 de diciembre de 2013. [fecha de consulta: 29 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=EAGXe4DNepY>
- ENVALES ENVALESCOM. *Aprende a escantillonar en pocos minutos con el SCT. Refuerzos. Parte 2*. [en línea] En: *Youtube*. 17 de diciembre de 2013. [fecha de consulta: 29 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=QhTKRaZThqk>
- ENVALES ENVALESCOM. *Aprende a escantillonar con el SCT. Parte 3*. [en línea]. En: *Youtube*. 15 de enero de 2014. [fecha de consulta 29 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Rx3axSloV8>
- GEO TUTORIALES. (21 de mayo de 2015). *Cómo se relaciona el Coeficiente de Correlación de Pearson (r) y el Coeficiente de Determinación r Cuadrado (r²)*. Gestión de Operaciones. [En línea] [fecha de consulta: abril de 2019]. Disponible en: <https://www.gestiondeoperaciones.net/estadistica/como-se-relaciona-el-coeficiente-de-correlacion-de-pearson-r-y-el-coeficiente-de-determinacion-r-cuadrado-r%C2%B2>
- MARINE TECHNOLOGY SOCIETY. *History*. [En línea] [fecha de consulta: 17 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://www.mtsociety.org/history-2/>
- MULDER MOTOREN. *Drawings marine*. [En línea] [fecha de consulta: 21 de mayo de 2019]. Disponible en: http://muldermotoren.nl/volvopentadvd/marine/drawings_marine.htm
- MULDER MOTOREN. *IPS 900 models*. [En línea] [fecha de consulta: 21 de mayo de 2019]. Disponible en: http://muldermotoren.nl/volvopentadvd/marine/productpage/ips900/ips_900_models.html

Otros recursos

- GARCIA, J. *Projectes de Sistemes Navals*. Apuntes de la asignatura, Universitat Politècnica de Catalunya, Atenea, 2018.
- JURADO, J. *Propulsors*. Apuntes de la asignatura, Universitat Politècnica de Catalunya, Atenea, 2017.
- *Master de disseny de tecnologia de yates*. Apuntes de la asignatura, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- ORTIGOSA, I. *Teoria del Vaixell*. Apuntes de la asignatura, Universitat Politècnica de Catalunya, Atenea, 2016.

